

M. S. SOMINSKI

SEMICONDUCTOARE

ȘI

APLICAȚIILE LOR TEHNICE

EDITURA TEHNICA



M. S. SOMINSKI

SEMICONDUCTOARE ȘI APLICAȚIILE LOR TEHNICE

TRADUCERE DIN LIMBA RUSĂ



EDITURA TEHNICĂ
BUCUREȘTI-1959

În carte sînt expuse, într-o formă elementară și accesibilă, noțiunile fundamentale de fizică semiconductoarelor, necesare pentru înțelegerea fenomenelor care au loc în toate tipurile posibile de aparate cu semiconductoare. Se descriu aceste aparate și se prezintă aplicațiile lor practice în diferite domenii ale științei și tehnicii.

Lucrarea se adresează unor cercuri largi de cititori.

М. С. Соминский
ПОЛУПРОВОДНИКИ
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ТЕХНИКЕ
Лениздат
1958



INTRODUCERE

Pînă acum vreo treizeci de ani, aproape nimeni nu auzise despre uimitoarea clasă de substanțe care au primit numele modest de „semiconductoare”. Cîțiva fizicieni de-abia începuseră să se ocupe de studiul amănunțit al proprietăților fizice și mai ales electrice ale acestor substanțe, fără a-și închipui cîtuși de puțin ce uriașe posibilități ascund în ele.

Pas cu pas, oamenii de știință au pătruns însă în tainele semiconductoarelor, au găsit noi legi fizice, au creat noi substanțe semiconductoare și au descoperit noi fenomene, care i-au surprins pe cei ce le-au studiat pentru prima dată. În mai bine de trei decenii, una dintre cele mai tinere ramuri ale științei, fizica semiconductoarelor, a înregistrat succese remarcabile. În prezent, se pare, nu există nici un domeniu al tehnicii în care semiconductoarele să nu fie folosite într-o măsură mai mare sau mai mică. Rolul, importanța și posibilitățile pe care le oferă sînt greu de apreciat la justa lor valoare. Recent, într-o cuvîntare a sa, eminentul savant sovietic, academicianul A. F. Ioffe, a spus pe bună dreptate: „Fizica modernă cunoaște două domenii de la care ne așteptăm la cele mai mari progrese în ce privește condițiile materiale de viață — nucleul atomic și semiconductoarele”.

Cu ajutorul semiconductoarelor au fost realizate numeroase și diverse aparate ce îndeplinesc o sumedenie de funcțiuni. Aceste aparate produc frig, înmagazinează energie magnetică, protejează liniile de înaltă tensiune împotriva descărcărilor electrice dăunătoare din atmosferă, preschimbă în lumină radiații invizibile pentru ochiul omenesc, transformă energia termică și radiantă direct în energie electrică, redresează curenții alternativi, amplifică oscilațiile electromagnetice slabe, măsoară umiditatea aerului, măsoară temperatura, numără particulele atomice elementare, transformă nemijlocit energia radiațiilor nucleare în energie electrică,

detectează obiecte încălzite, aflate la distanță, și îndeplinesc multe alte funcțiuni.

În fața semiconductoarelor se deschid nemărginite perspective. Nu e de mirare, deci, că an de an se mărește numărul de cercetători care își dăruiesc timpul, cunoștințele și forțele creatoare, studiului acestei extraordinare clase de substanțe.

Dar ce sînt semiconductoarele și în ce constă particularitățile lor? Mai întîi de toate, menționăm că însăși această denumire are o proveniență pur istorică și nu dezvăluie esența fizică a categoriei de substanțe care ne interesează. Prin manifestările lor pur exterioare, semiconductoarele ocupă un loc intermediar între metale, care posedă o conductivitate electrică foarte mare, și materialele izolante, a căror rezistivitate poate atinge valori uriașe pînă la $10^{20} \Omega \text{ cm}$. Dacă conductivitatea diferitelor metale este cuprinsă aproximativ între limitele $6 \cdot 10^3$ și $6 \cdot 6 \cdot 10^5 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$, valoarea conductivității semiconductoarelor variază aproximativ de la 10^4 pînă la $10^{-10} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$. Proprietățile surprinzătoare ale semiconductoarelor nu provin însă cîtuși de puțin de la faptul că ele nu conduc electricitatea nici atît de bine ca metalele, nici atît de rău ca materialele izolante, ci se datoresc altor cauze fizice, mult mai profunde, despre care se va vorbi amănunțit în cele ce urmează.

Semiconductoarele alcătuiesc o clasă de substanțe foarte numeroase și răspîndite în natură: practic toți oxizii de metale, sulfurile, seleniurile, telururile, unele săruri metalice duble, triple sau cuaduple, precum și o serie de elemente simple cum sînt carbonul (sub formă de grafit), telurul, borul, siliciul, fosforul, germaniul, arsenul, seleniul și forma alotropică cenușie a cositorului. După expresia plastică a academicianului A. P. Ioffe, „semiconductoarele reprezintă aproape întreaga lume anorganică ce ne înconjoară“.

Fizicienii și chimiștii, metalurgiștii și geologii au studiat timp îndelungat diferitele proprietăți ale compușilor chimici semiconductori, cu excepția proprietăților electrice. Iată de ce această minunată clasă de substanțe a rămas de fapt în umbră și îi interesa pe oamenii de știință numai într-o singură privință: obținerea, din compușii chimici, a unor metale și metaloizi în stare pură. Acum treizeci de ani, însă, lucrurile s-au schimbat radical și, în prezent, proprietățile electrice ale semiconductoarelor sînt studiate intens de fizicieni și chimiști din majoritatea țărilor.

În Uniunea Sovietică, studiul sistematic al semiconductoarelor a fost inițiat la Leningrad. Chiar de la începutul deceniului al treilea al secolului nostru, academicianul A. P. Ioffe, conducătorul uneia dintre cele mai mari școli de fizicieni, a strâns în jurul lui un grup de tineri talentați și a purces la studierea, sub toate aspectele, a proprietăților fizice ale substanțelor semiconductoare. Lucrările lui A. P. Ioffe și ale elevilor și colaboratorilor lui au dat rezultate valoroase atât din punct de vedere practic, cât și teoretic. De atunci, cercetările de fizica semiconductoarelor s-au extins și în momentul de față ele nu atrag numai atenția oamenilor de știință din Leningrad. Fizicienii din Moscova, Kiev, Vilnius, Harkov, Erevan, Saransk și alte orașe, se străduiesc cu perseverență să rezolve cele mai importante probleme ale fizicii semiconductoarelor. Și dacă în ultimii ani au fost obținute uriașe succese, trebuie să se presupună că și în viitor ne putem aștepta la nu mai puține reușite. Secretul tuturor acestor realizări este rezultatul a doi factori esențiali: proprietățile fizice excepționale ale semiconductoarelor și munca colosală depusă de un mare număr de fizicieni, chimiști și tehnicieni, care au reușit să descopere și să folosească aceste proprietăți. Această activitate de proporții într-adevăr gigantice se extinde pe zi ce trece. În fiecare an, tot mai numeroși sînt cercetătorii, inginerii și tehnicienii atrași în orbita ei și sîntem îndreptățiți să credem că tocmai în aceasta constă chezașia viitoarelor succese ale fizicii semiconductoarelor, care ocupă un loc de frunte în progresul tehnic.

CAPITOLUL I

PROPRIETAȚILE ELECTRICE ALE SEMICONDUCTOARELOR

1. STRUCTURA ATOMULUI

Înainte de a proceda direct la studiul proprietăților fizice ale semiconductoarelor, este necesar să spunem câteva cuvinte despre structura atomului.

Ce este atomul?

Atomul, ceea ce în limba greacă înseamnă „indivizibil”, constituie cea mai mică particulă dintr-un element chimic. Prin nici un fel de forțe și mijloace nu este posibil ca această particulă minusculă să fie împărțită nici măcar în două alte particule, astfel ca fiecare să reprezinte o bucățică din elementul inițial respectiv.

Din atomi sînt alcătuite toate elementele chimice: hidrogenul, oxigenul, azotul, clorul, fluorul, fierul, cuprul, wolframul, uraniul, curiul, einsteiniul, mendeleeviul și multe altele, în total 102 elemente cunoscute pînă acum.

În 1869, D. I. Mendeleev a descoperit legea periodicității proprietăților elementelor. El a ordonat atomii într-un sistem și a așezat toate elementele în uimitoarea lui tabelă, care reflectă clar particularitățile și proprietățile fizico-chimice ale acestora.

În natură există însă nu numai substanțe simple, elementele chimice, dar și compuși chimici complecși formați din elemente. Astfel, de exemplu, apa este un compus format din hidrogen și oxigen.

Cea mai mică particulă posibilă din orice substanță compusă se numește moleculă și este formată întotdeauna din anumiți atomi. Prin urmare, atomii diferitelor elemente sînt capabili să se grupeze în particule mai voluminoase și mai complexe — moleculele. Molecula de apă este alcătuită din doi atomi de hidrogen și un atom de oxigen. O moleculă de

acid sulfuric este formată din doi atomi de hidrogen, un atom de sulf și patru atomi de oxigen. O moleculă de sare de bucătărie se compune din numai doi atomi: un atom de sodiu și unul de clor. Din alcătuirea unei molecule de acid azotic fac parte cinci atomi: un atom de hidrogen, un atom de azot, și trei atomi de oxigen. Există molecule încă și mai complicate, a căror structură este formată din zeci, sute și chiar mii de atomi.

Dar este oare atomul într-adevăr indivizibil, așa cum au crezut vechii greci și chiar majoritatea învățaților din secolul al XIX-lea? La această întrebare știința a răspuns negativ. Atomul s-a dovedit a fi un sistem complicat, alcătuit din particule încă și mai mici.

În prezent, taina structurii atomului — această „piatră unghiulară a universului” — a fost descoperită. Se știe astăzi că atomul oricărui element chimic se compune dintr-un nucleu greu central și din mai mulți electroni care îl înconjoară. Masa principală a atomului este concentrată în nucleul lui. Cel mai ușor nucleu este acela al atomului de hidrogen, care este de 1840 ori mai greu decât electronul. Nucleul posedă o sarcină electrică pozitivă. Electronii sînt însă purtători de electricitate negativă. Nucleele încărcate pozitiv ale diferitelor elemente se deosebesc între ele prin masa și valoarea sarcinii lor electrice. Electronii nu se deosebesc prin nimic unul de altul: electronul „de oxigen” este absolut identic cu electronul „de platină”, „de aur”, „de hidrogen”. Toți acești electroni au una și aceeași masă și o sarcină electrică negativă absolut identică.

Dacă în atomii fiecărui element există întotdeauna numai un singur nucleu, în schimb numărul de electroni este diferit. Cu cît atomul este mai greu, cu atît în structura lui intră un număr mai mare de electroni. În atomul de hidrogen există numai un singur electron, în atomul de oxigen 8, în atomul de argint 47, în atomul de uraniu 92, iar în atomul de nobeliu *) — cel mai greu dintre elementele cunoscute — 102 electroni.

Deoarece nucleul și electronii sînt încărcăți cu electricitate de nume diferit, ei se atrag reciproc. Aceste forțe de atracție depind de distanțele dintre electroni și nucleu. Odată cu creșterea acestei distanțe, forțele de atracție slăbesc. Elec-

*) Elementul nobeliu, cu numărul de ordine 102, a fost descoperit în martie 1957. Simbolul lui este No.

tronii nu „cad“ pe nucleu, ci se află față de el la o anumită distanță, bine determinată. Această stabilitate a electronilor se explică prin faptul că ei se rotesc neîntrerupt în jurul nucleului.

În atomul fiecărui element, electronii sînt aranjați în „etaje“ formînd sistemul de „pături“ (sau orbite) electronice. Pe fiecare orbită se pot afla numai un număr strict determinat de electroni, care nu poate fi depășit. Prima orbită, și cea mai apropiată de nucleu, orbita K, poate avea numai doi electroni, a doua orbită notată cu litera L, 8 electroni, a treia orbită (M) 18 electroni, iar a patra (N) 32 electroni. Orbitalele nu sînt întotdeauna ocupate în întregime cu numărul de electroni pe care ele îi pot avea. De cele mai multe ori, orbitalele exterioare sînt incomplete. Orbitalele O, P și Q nu sînt niciodată completate cu toți electronii pe care-i pot primi.

Sarcina globală a tuturor electronilor atomului este precis egală cu sarcina nucleului lui, și, din această cauză, atomul este complet neutru din punct de vedere electric. Vorbind despre neutralitatea electrică a unui atom sau a unei molecule, trebuie să se atragă atenția asupra unui amănunt important. Cînd electronii se rotesc absolut simetric în jurul nucleului, poziția lor mijlocie coincide cu poziția nucleului. La un atom de acest fel, valoarea medie a momentului lui electric este nulă. Reamintim că se numește moment electric produsul dintre una din sarcini (cele două sarcini sînt egale și de semn opus) și distanța dintre ele. Sînt însă frecvente cazurile cînd, datorită unor anumite cauze, în timpul deplasării electronilor în jurul nucleelor apare o perturbare a acestei simetrii. Ea se manifestă prin faptul că electronii trec în cea mai mare parte a timpului printr-o anumită regiune a moleculei. Lucrurile stau ca și cînd electronii ar fi deplasați lateral în raport cu nucleele. În asemenea împrejurări, molecula devine polară și posedă un moment electric oarecare.

Electronii de valență care alcătuiesc pătura cea mai exterioară a atomului, fiind cei mai îndepărtați de nucleu, sînt legați cel mai slab de acesta. Din această cauză, în anumite condiții, atomul poate pierde unul sau chiar mai mulți dintre electronii lui. Atunci, un asemenea atom încetează de a mai fi neutru și se transformă într-un ion încărcat pozitiv. Sarcina pozitivă a unui ion de acest fel este determinată de sarcina globală a tuturor electronilor pierduți de el. În anumite împrejurări, din atom pot pleca nu numai electronii de valență, dar și electroni de pe orbite mai interioare.

Care sînt cauzele fizice care creează posibilitatea apariției unor ioni în corpuri? Există relativ multe asemenea cauze. Una dintre ele este mișcarea termică a atomilor. În corpurile solide, lichide și gazoase, mișcarea termică se manifestă în mod diferit. În gaze, ea se exprimă printr-o deplasare extraordinar de rapidă a atomilor prin întreg volumul gazului. Atomii sau moleculele ce formează un gaz oarecare se vor deplasa cu cele mai diferite viteze și în toate direcțiile posibile, suferind nenumărate ciocniri în drumul lor. Datorită acestei mișcări haotice, traiectoria unui atom sau a unei molecule de gaz reprezintă o linie frîntă, la care punctele de frîngere corespund ciocnirii unei particule cu alta.

În corpurile solide, și în continuare va fi vorba numai despre ele; mișcarea termică se manifestă prin faptul că particulele ce alcătuiesc corpul considerat, adică atomii și moleculele, nu se deplasează ca într-un gaz, prin întreg volumul corpului, ci numai săvîrșesc oscilații în jurul anumitor poziții centrale. Oricare ar fi însă caracterul mișcării termice, întotdeauna și în toate cazurile ea este întovărășită de nenumărate ciocniri ale particulelor între ele. În acest caz, se poate întîmpla ca în momentul unei ciocniri puternice, dintr-un atom să fie smulși unul sau chiar mai mulți electroni. Atunci, un asemenea atom va deveni un ion. Dar care este soarta acestor electroni smulși? Pentru o perioadă de timp foarte scurtă, care a căpătat denumirea de „timp de viață”, acești electroni vor vagabonda liber prin întregul volum al corpului solid, iar după aceea vor fi atrași și captați din nou de unii ioni pozitivi sau chiar de atomi neutri. În ultimul caz, atomii care anterior erau neutri, dobîndind o sarcină negativă suplimentară, se vor transforma în ioni încărcăți negativ.

În ceea ce privește structura materiei, fizica modernă a stabilit o serie întreagă de legi dintre cele mai importante, străine spiritului fizicii vechi, așa-numita fizică clasică, prin introducerea noțiunii de cuantificare. Firește, aceste legi nou descoperite, care la prima privire par stranii și cel puțin uimitoare, au constituit rezultatul unor cercetări teoretice și experimentale profunde. Dar ce legi a stabilit teoria cuantică în știința despre structura atomului? S-a descoperit că fiecare electron care face parte din structura unui atom poate dispune numai de o energie strict determinată. Spectrul energetic al electronilor nu este continuu, ci prezintă o structură discretă. Aceasta înseamnă că electronii care alcătuiesc un

atom nu pot avea orice energie, ci se pot afla numai în stările energetice „permise”. De aceea, dacă studiem un atom concret oarecare, electronii acestui atom vor fi distribuiți conform unor stări energetice riguros determinate, care mai poartă denumirea de „nivele energetice”. În anumite condiții, electronul poate trece de la un nivel de energie „permis” la altul, dar nu se poate afla în nici o stare intermediară, aceasta fiind „interzisă”. Din punctul de vedere al mecanicii clasice, care s-a obișnuit cu continuitatea, o asemenea situație pare cât se poate de absurdă: existența unor niveluri permise și interzise nu-și găsește nici un fel de justificări îndreptățite în cadrul științei clasice. Dar, din punctul de vedere al concepțiilor cuantice actuale, asupra naturii lucrurilor, o asemenea situație nu este numai fundamentată teoretic, dar este și demonstrată pe cale experimentală.

Experiența și teoria arată că într-un atom nu pot exista mai mult decât doi electroni care să se găsească în una și aceeași stare. De aceea, chiar și în cel mai complicat atom, toți electronii sînt repartizați conform nivelurilor lor de energie. Deoarece electronii sînt legați de nucleul atomului prin forțele de atracție coulombiene, trecerea electronului de la un nivel mai scăzut la un nivel mai înalt este legată de o cantitate de energie, care trebuie să fie cedată atomului. Trecerea inversă, de la un nivel energetic mai înalt la un nivel mai scăzut, este întovărășită de pierderea de către atom a unei anumite cantități de energie.

Este cât se poate de evident că dacă electronii pot ocupa într-un atom numai anumite niveluri de energie, strict determinate, și nu se pot găsi pe nivelurile intermediare, „interzise”, atît pierderea de energie de către un electron, cît și dobîndirea de energie de către acesta, nu se produc continuu, ci discret, în salturi. Acest principiu teoretic evident a fost confirmat de nenumărate lucrări experimentale.

În cazul trecerii electronului de la un nivel de energie mai înalt la unul mai scăzut se emite o cuantă de lumină. Invers, absorbția unor cuante de lumină de către atomii materiei este însoțită de către trecerea electronilor de la niveluri de energie mai scăzute la niveluri mai înalte.

Dar ce sînt cuantele de lumină?

Printr-o serie întreagă de experiențe s-a stabilit că lumina nu este emisă și absorbită într-un flux continuu, ci în porțiuni separate. Aceste porțiuni au căpătat în fizică denumirea de cuante de lumină sau fotoni. Prin urmare, fotonul este o

porțiune elementară de radiație. În consecință, fluxul luminos are o structură discontinuă și este format dintr-un număr uriaș de fotoni. Pe de altă parte, fiecare radiație posedă și proprietăți ondulatorii, care se manifestă cu atât mai pregnant, cu cât frecvența este mai mică. Radiația posedă simultan atât proprietăți ondulatorii cât și cuantice, însă în unele cazuri (la frecvențe mai mari) se observă ușor proprietățile cuantice, iar în alte cazuri (frecvențe mai mici) se observă ușor proprietățile ondulatorii. Un electron care se găsește pe un nivel notat convențional cu cifra 2, posedă energia W_2 . Când se găsește pe nivelul mai scăzut 1, electronul are energia W_1 . Așa dar, în cazul trecerii unui electron de la nivelul 2 la nivelul 1, atomul radiază un foton cu energia Σ , avînd valoarea

$$\varepsilon = W_2 - W_1.$$

Teoria cuantică a luminii a stabilit că există o relație cît se poate de riguroasă, respectată întotdeauna, între frecvența oscilațiilor luminoase și valoarea energiei fotonului. Cu cît frecvența luminii emise este mai mare, cu atât fotonul posedă mai multă energie și, invers, o dată cu micșorarea frecvenței energia lui scade. Dacă se notează cu Σ energia fotonului, expresia $\varepsilon = h\nu$ va reflecta tocmai această dependență. Aici ν este frecvența luminii, iar h o constantă universală numită constanta lui Planck și egală cu $6,62 \cdot 10^{-27}$ erg s.

Teoria cuantică a luminii, creată de marele fizician Albert Einstein, a permis să se descopere taina structurii atomului, a dat posibilitatea să se înțeleagă multe fenomene inexplicabile de pe pozițiile fizicii clasice și a constituit un stimulent puternic pentru cunoașterea ulterioară a naturii.

2. METALELE

Toate metalele se caracterizează printr-o conductivitate mare, care ajunge pînă la sute de mii de mho. Astfel, de exemplu, conductivitatea argintului este $\sigma = 6 \cdot 10^5 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$. Cauza acestei conductivități electrice apreciabile se ascunde în condițiile specifice de legătură între electronii de valență ai atomului de metal și nucleul acestui atom. Spre deosebire de multe alte substanțe, în atomii metalelor nu toți electronii

sînt suficient de rigid legați de nucleele lor. Electronii care alcătuiesc păturile electronice exterioare sînt atrași cel mai puțin de către nucleu. O asemenea situație are loc nu numai la atomii metalelor, dar și în atomii altor substanțe. Atomii metalelor prezintă însă o particularitate care distinge net metalele de restul celorlalte corpuri solide. Această particularitate constă în faptul că în pătura electronică exterioară a atomului unui metal există cel puțin un electron care este atît de slab legat de nucleul respectiv, încît se poate elibera ușor de atracția nucleului și poate părăsi limitele atomului propriu vagabondînd liber prin întreaga masă a metalului. Aici este important să se sublinieze că eliberarea unui asemenea electron din atomul propriu se produce fără nici un fel de influență exterioară asupra lui. La formarea unui metal, prin urmare, atomii lui pierd o parte din electroni. În mod obișnuit, numărul acestor electroni — în ce privește ordinul de mărime — este egal cu numărul atomilor de metal din unitatea de volum, adică fiecare atom de metal pierde cîte un electron. Acești electroni, care se eliberează ușor, rătăcesc printre nuclee, cînd ocupînd locurile libere care s-au format în vecinătatea unor nuclee, cînd părăsindu-le din nou. Dacă presupunem că într-un corp metalic oarecare există 10 trilioane de atomi, în același corp se vor găsi cel puțin 10 trilioane de electroni care s-au smuls din atomii lor. Și toate aceste trilioane de electroni, care s-au eliberat de forțele de interacțiune ce îi leagă de nuclee, rătăcesc liber prin întreaga bucată de metal, trecînd de la un atom la altul, de la un spațiu interatomic la altul.

Dar căror nuclee le aparțin acești electroni vagabonzi? Strict vorbind, niciunora. Electronii vagabonzi aparțin în egală măsură întregii mase de atomi care formează metalul respectiv. Electronii de acest fel sînt numiți „liberi” în fizica modernă, subliniindu-se prin aceasta faptul că nu sînt legați de atom și posedă posibilitatea de a călători în orice direcții din interiorul unei mase de metal oarecare.

Atomul de metal care a pierdut unul sau mai mulți electroni va deveni un ion. De aceea, un electron liber, la întîlnirea cu un asemenea ion, poate intra din nou în structura lui, dînd naștere unui atom neutru. În consecință, în orice metal se desfășoară un proces complicat, care nu se întrerupe nici măcar o secundă: formarea electronilor liberi și recombinația lor cu ionii. Datorită existenței acestor procese inverse, concentrația electronilor liberi dintr-un metal este con-

stantă. Caracterul constant al concentrației este condiționat de faptul că, în orice moment, în metal există un echilibru dinamic între electronii liberi nou formați și electronii care au intrat iarăși în sistemul unui ion oarecare.

Concentrația de electroni liberi ai unui metal tipic, adică numărul lor pe unitatea de volum, are o valoare riguros determinată, egală cu numărul de atomi din unitatea de volum, înmulțit cu valența metalului respectiv. Dacă drept unitate de volum s-a luat 1 cm^3 , în el vor exista aproximativ 10^{23} atomi; deci, numărul de electroni liberi din 1 cm^3 va fi aproximativ egal cu $n \cdot 10^{23}$, unde n este valența metalului. Este cât se poate de util și excepțional de important faptul că concentrația electronilor liberi dintr-un metal își păstrează valoarea constantă și practic nu depinde de nici un fel de factori exteriori: temperatură, presiune, umiditate. Aceasta înseamnă că atât la zero absolut, cât și la temperatura de topire, în metal există una și aceeași cantitate de electroni liberi, împrejurare care joacă un rol important și diferențiază net metalele de toate celelalte corpuri solide.

Prin urmare, metalele sînt alcătuite din ioni. Fiecare ion ocupă o poziție fixă oarecare. Mișcarea termică se manifestă aici prin faptul că ionii săvîrșesc oscilații de amplitudine mică în jurul poziției de echilibru. Odată cu creșterea temperaturii, amplitudinea oscilațiilor se va mări, iar dacă temperatura scade — va deveni mai mică.

Dimensiunile ionilor, la drept vorbind, sînt determinate de dimensiunile păturilor lor electronice exterioare, și sînt de același ordin de mărime ca și distanțele dintre ele. Păturile electronice ale atomilor unui metal sînt atât de împletite între ele, încît numai electronii cei mai apropiați de un nucleu formează cu nucleul un fel de ansamblu și fac împreună cu el mișcările oscilatorii.

Electronii liberi, distribuiți uniform în întreaga masă a metalului, determină conductivitatea electrică de valoare mare a acestuia și formează un fel de „gaz electronic”. Acest termen, adoptat în fizica modernă, provine din compararea comportării electronilor liberi dintr-un metal cu comportarea moleculelor de gaz.

Curentul electric ce apare într-un conductor metalic reprezintă un flux de electroni liberi, care se deplasează în sens invers cîmpului electric.

Ionii grei, încărcați pozitiv, ai metalului, oscilează în jurul pozițiilor lor de echilibru și nu participă la mișcarea

dirijată în sensul câmpului. De aceea, cînd printr-un conductor metalic circulă un curent electric, acest proces nu este însoțit de un transport al materiei conductorului. După expresia plastică a unui fizician, „electronii de conducție dintr-un metal pot fi comparați cu aerul care se găsește în porii unei substanțe poroase oarecare (de exemplu, un burete) : dacă se face în așa fel, încît într-o parte a buretelui presiunea aerului să fie mai mică decît în altă parte, aerul se va infiltra prin burete, iar diferitele particule de aer vor descrie traectorii foarte neregulate, ciocnindu-se și amestecîndu-se unele cu altele și urmărind totodată contururile porilor din interiorul buretelui. Fluxul de electroni care trece printr-un metal este în linii mari analog unui asemenea curent de aer care circulă printr-o substanță poroasă, deoarece vitezele electronilor izolați pot fi îndreptate în orice direcție și numai în medie se obține infiltrarea „gazului electronic“ prin metal.

Analogia prezentată reflectă în mare măsură aspectul fizic al fenomenului de apariție a curentului electric într-un metal. Electronii liberi se deplasează în interiorul metalului cu viteze colosale ca valoare, ce ajung la sute de milioane de centimetri pe secundă. Direcția acestor viteze este cît se poate de diferită : electronii zboară vertiginos în toate părțile, suferind nenumărate ciocniri în drumul lor. Se înțelege că în cazul fiecărei ciocniri de acest fel dintre un electron și un ion care oscilează în rețeaua cristalină, se schimbă fie valoarea, fie direcția vitezei electronului care s-a ciocnit, fie ambele.

Dacă unui metal i se aplică un cîmp electric exterior, sub influența acestui cîmp electronii de conducție vor începe să capete o viteză suplimentară, dirijată în sens invers cîmpului electric și toți aceștia vor începe să se deplaseze în metal, ca un întreg, de la potențialul mai scăzut spre potențialul mai înalt. Dacă electronii de conducție, în timpul deplasării lor, sub influența cîmpului electric, nu ar suferi nici un fel de rezistență, viteza lor ar crește mereu în cazul unei valori constante a intensității cîmpului electric aplicat. Dar aceasta nu se întîmplă. Viteza medie a electronilor de conducție, pentru o valoare dată a intensității cîmpului, atinge — în fiecare metal — o valoare finită oarecare. Creșterea ulterioară a vitezei are loc numai odată cu mărirea intensității cîmpului electric aplicat metalului. În conformitate cu legea lui Ohm, această creștere a vitezei va fi direct proporțională cu creșterea intensității cîmpului, ceea ce — exprimat în imagini mai obișnuite — nu înseamnă altceva decît că

intensitatea curentului este direct proporțională cu diferența de potențial aplicată.

Este ușor să se calculeze intensitatea $I = Q/t$ a acestui curent, adică o mărime care constituie măsura cantității de electricitate Q care trece, în unitatea de timp, prin secțiunea transversală a conductorului. Să admitem că aria secțiunii transversale a conductorului este egală cu $S \text{ cm}^2$ și că în fiecare centimetru cub din conductor se găsesc n electroni de conducție. Să presupunem după aceea, că mobilitatea electronilor liberi, adică viteza lor medie de deplasare sub influența unui câmp electric având intensitatea de 1 V/cm , are valoarea $u \text{ cm}^2/\text{sV}$. În acest caz, intensitatea I a curentului va fi egală cu

$$I = neuSE,$$

unde E este intensitatea câmpului electric, iar e — sarcina electronului, egală cu

$$e = 4,803 \cdot 10^{-10} \text{ CGSE} = 1,601 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$$

Expresia (1) reprezintă tocmai legea lui Ohm scrisă într-o formă oarecum neobișnuită. Pe de altă parte, se știe că legea lui Ohm este exprimată de obicei astfel:

$$I = \frac{V_2 - V_1}{R},$$

unde $V_2 - V_1$ este diferența de potențial dintre capetele conductorului, iar R — rezistența acestuia. Egalând părțile drepte ale expresiilor (1) și (2), vom obține:

$$neuSE = \frac{V_2 - V_1}{R}$$

Dar $V_2 - V_1 = EL$, unde L este lungimea conductorului. Atunci

$$neuSE = \frac{EL}{R},$$

de unde rezultă

$$R = \frac{I}{neu} \cdot \frac{L}{S}.$$

Examinând această formulă se observă că $\frac{I}{neu} = \rho$ este rezistivitatea conductorului, iar $neu = \sigma$ — conductivitatea acestuia.

Viteza medie de deplasare dirijată a electronilor de conducție, pentru o valoare strict determinată a intensității câmpului electric, reprezintă pentru metalul considerat — la aceeași temperatură a lui — o mărime constantă oarecare. Asupra tuturor electronilor unui metal care se află într-un câmp electric acționează însă forțe electrice care îi obligă să se deplaseze accelerat. Dar de ce, cu toate aceste condiții, electronii de conducție se deplasează totuși cu viteza constantă? Acest fenomen se explică ușor dacă se ține seama că electronii care se deplasează printr-un metal întâmpină în drumul lor rezistența condiționată de numărul colosal de ciocniri dintre electroni și ioni în stare de vibrație ai metalului. Această împrejurare face ca viteza de deplasare dirijată a electronilor de conducție, pentru valoarea respectivă a intensității câmpului să capete o valoare constantă oarecare. Calculele arată că viteza medie a electronilor care se deplasează într-un metal sub influența diferenței de potențial aplicate, este foarte mică în comparație cu vitezele determinate de mișcarea termică. În ce privește mobilitatea, aceasta se măsoară prin câteva zeci de centimetri pe secundă. Practic, aceasta înseamnă că în cazul unui câmp cu intensitatea de 1 v/cm , în conductor electronii de conducție se vor deplasa în medie, în timp de o secundă, cu numai câteva zeci de centimetri. În legătură cu aceasta apare o altă întrebare: de ce atunci când închidem, cu ajutorul unui întrerupător, un circuit electric, curentul apare practic instantaneu și la cel mai îndepărtat capăt al liniei? În adevăr, dacă legăm Leningradul de Moscova printr-o linie electrică, iar apoi „trimitem” curent pentru Moscova, se va observa că apariția curentului la Moscova se produce aproximativ la două miimi de secundă după închiderea întrerupătorului în Leningrad. De aici s-ar putea trage concluzia că viteza dirijată de mișcare a electronilor este excesiv de mare. Știind că distanța dintre Moscova și Leningrad este aproximativ egală cu 600 km se poate calcula această viteză. Ea se dovedește a fi egală cu $300\,000 \text{ km/s}$. O asemenea concluzie, dacă am ajunge la ea, ar fi însă pripită. Intervalul de timp dintre închiderea întrerupătorului și apariția curentului este într-adevăr foarte mic, dar aceasta se explică nu prin viteza uriașă de deplasare a electronilor de conducție, căpătată de aceștia din urmă datorită existenței diferenței de potențial, ci de viteza colosală de propagare prin conductoare a câmpului electric, care — la drept vorbind — „gonește” electronii de la Leningrad spre Moscova.

La două miimi de secundă după închiderea întrerupătorului la Leningrad, câmpul electric produs de centrala electrică din Leningrad se va propaga pînă la Moscova. Pe întreaga lungime a conductoarelor, în decursul acestui interval de timp, el va pune în mișcare toți electronii liberi de pe întreaga linie, inclusiv aceia din partea de linie care este așezată chiar la Moscova.

Prin urmare, apariția excepțional de rapidă a curentului electric pe întreaga linie este condiționată numai de viteza foarte mare de propagare a câmpului electric.

Din toate cele arătate referitor la conductivitatea electrică a unui metal, rezultă că electronii liberi condiționează proprietățile electrice ale acestuia. Trebuie să mai adăugăm că de comportarea acestor electroni depind și proprietățile magnetice, optice, termice și chimice ale metalului.

Din examinarea naturii fenomenului de conducție electrică într-un metal, rezultă inevitabil încă o consecință: variația în funcție de temperatură a rezistivității. În adevăr, după cum arată experiența, rezistivitatea unui metal se mărește o dată cu creșterea temperaturii și, invers, se micșorează atunci cînd temperatura scade. Rezistivitatea este însă determinată de trei mărimi: mobilitatea electronilor, concentrația lor și sarcina electronului:

$$\rho = \frac{1}{neu},$$

Pentru un anumit metal, concentrația n și sarcina e a electronului sînt mărimi constante, care nu depind de temperatura metalului. Pe de altă parte, este evident că mobilitatea u a electronilor trebuie — fără îndoială — să depindă și ea de temperatură. În adevăr, o dată cu creșterea temperaturii, mișcarea termică se intensifică, ceea ce perturbază regularitatea structurii interne a metalului, ducînd la ciocniri mai frecvente între electroni și ionii metalului. Acest fapt, la rîndul lui, îngreuiază infiltrarea electronilor prin metal, și ca urmare, pentru aceeași intensitate de 1 V/cm a câmpului electric, viteza de deplasare a purtătorilor de curent, adică mobilitatea lor, va fi mai mică; în consecință, rezistivitatea ρ se mărește. Odată cu scăderea temperaturii metalului, mișcarea termică devine mai puțin intensă, structura metalului se ordonează și numărul de ciocniri între electronii liberi și ionii metalului se micșorează ceea ce ușurează trecerea electronilor prin metal. Toate acestea duc la creșterea mobilității. În apro-

piere de temperatura de zero absolut, electronii nu întâmpină practic nici o rezistență; din această cauză, conductibilitatea electrică a unui metal, la fel ca și mobilitatea electronilor, are o valoare mare. La unele metale, în cazul unor temperaturi scăzute apare o stare calitativ nouă — super-conductibilitatea, interesantă prin faptul că rezistivitatea se anulează.

La majoritatea metalelor pure, într-un interval de temperatură mic, rezistivitatea ρ depinde liniar de temperatură, conform legii:

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha t),$$

unde α este un coeficient de temperatură egal numeric cu 0,00367;

ρ_0 — rezistivitatea la 0°C.

Vorbind despre electronii liberi dintr-un metal, este interesant să amintim despre experiențele istorice prin care s-a stabilit valabilitatea concepțiilor

expuse, referitoare la mecanismul conductibilității electrice a metalelor. Experiențe de acest fel au fost efectuate în număr mare la timpul lor. Vom vorbi despre două dintre ele. În 1901, Rieke a confecționat trei cilindri: unul de cupru, unul de aluminiu și iarăși

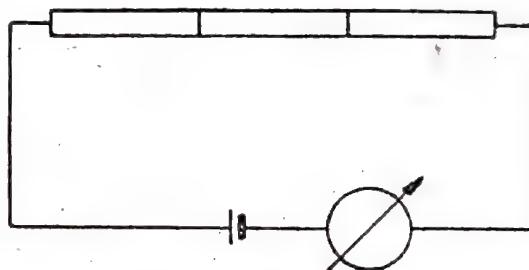


Fig. 1. Schema experienței lui Rieke

unul de cupru. Bazele acestor trei cilindri, el le-a făcut riguros plan paralele și le-a șlefuit cu grijă. După aceea i-a pus unul peste altul și i-a fixat rigid (fig. 1). În această situație, prin cilindri a circulat neîncetat un curent continuu, timp de un an întreg. În această perioadă, prin cilindri au trecut 3.448.800 coulombi de electricitate. Dacă trecerea curentului prin metal ar fi fost însoțită de transportul materiei, atomii de metal care formează un cilindru, ar fi pătruns în alt cilindru. Nu s-a putut însă observa nimic de felul acesta. Cilindrii nu s-au modificat cîtusi de puțin și și-au păstrat greutatea cu o eroare de $\pm 0,03$ mg.

Experiența lui Rieke a dovedit elocvent faptul că ionii metalului nu iau deloc parte la formarea curentului.

O altă experiență, efectuată în 1916 de către fizicienii americani Stuart și Tolman, a demonstrat evident că conductibilitatea electrică a metalelor este condiționată numai de electroni. Schema acestei experiențe este următoarea: o bobină

cu număr mare de spire, confecționată din sîrmă izolată, este rotită foarte repede, iar după aceea este frînată brusc. Cu ajutorul unui dispozitiv special, capetele bobinei se conectează la un așa-numit galvanometru balistic, un aparat care arată ce cantitate de electricitate trece prin el. Dacă în metal există într-adevăr electroni liberi, după oprirea bruscă a bobinei ei trebuie să continue să se mai deplaseze un timp oarecare, datorită inerției, ceea ce va provoca deviația corespunzătoare a galvanometrului. Dacă însă nu există electroni liberi, în cazul acestei experiențe — după oprirea bobinei — acul galvanometrului nu trebuie să devieze din poziția lui de zero.

S-a descoperit că oprirea bruscă a unei bobine în stare de rotație, atrage după sine apariția unui curent de foarte scurtă durată. Galvanometrul balistic arată cantitatea de electricitate care circulă prin el. În funcție de sensul curentului electric, se poate afla ce fel de sarcini se deplasează prin conductorul bobinei, — pozitive sau negative. Această analiză cît se poate de simplă arată că prin bobină se deplasează purtători de electricitate negativă. Condițiile experienței și măsurarea mărimilor corespunzătoare, permit să se calculeze, pentru sarcinile electrice care se deplasează prin sîrmă datorită inerției, raportul dintre sarcina e și masa m a acestora. Rezultatele calcului coincid precis cu valoarea calculată a raportului e/m al electronilor. Repetînd această experiență de mai multe ori, și cu bobine înfășurate din sîrme metalice diferite — de cupru, de fier, de argint și altele — se obține invariabil, cu erorile inevitabile oricăror experiențe, unul și același rezultat. Acest fapt confirmă natura unică a electronilor care fac parte din alcătuirea atomilor oricăror metale. Experiența, în întregul ei, dovedește că într-un metal există într-adevăr un număr oarecare de electroni liberi, nelegați de atomi, care — în anumite condiții — formează un curent electric.

3. CRISTALELE

Din nespus de bogata varietate de corpuri solide din natură, majoritatea au o structură cristalină. Deosebindu-se printr-o serie de proprietăți specifice, cristalele ies puternic în evidență dintre toate celelalte corpuri și au atras atenția oamenilor de știință încă din cele mai vechi timpuri. Timp

îndelungat s-au făcut încercări de a le descoperi structura, dar toate aceste încercări s-au sfârșit invariabil cu insuccese. Încă la sfârșitul secolului al XVIII-lea, cristalograful Hein a emis ipoteza că toate cristalele sînt alcătuite din atomi așezați regulat. Această ipoteză nu era însă cu nimic mai mult decît o presupunere îndrăzneată, nesustînută de nici un fapt justificat pe cale experimentală.

Într-o carte a sa, tipărită la sfârșitul secolului al XIX-lea cunoscutul savant englez Perry scria: „Nu este necesar să vă enumăr și alte exemple din lista lungă a acelor proprietăți remarcabile ale corpurilor solide, pe care încă nu le înțelegem. Tehnicienii știu foarte multe despre ele și se bazează pe proprietățile lor, însă, după cît se pare, nici unul dintre ei nu are nici cea mai mică idee despre cauzele care provoacă aceste proprietăți. Nu este vorba de faptul că tehnicianul încălzește oțelul și descoperă schimbările uimitoare ale proprietăților acestuia în cazul unei modificări neînsemnate a compoziției lui chimice, ci de faptul că omul de știință și tehnicianul sînt la fel de documentați în privința acestor fapte, și tot la fel, nu au idee despre adevărata lor natură“.

Această situație a existat pînă în 1885, cînd — în fine — în înțelegerea naturii cristalelor a avut loc primul salt uriaș. În acest an, cunoscutul cristalograf E. S. Fedorov din Petersburg, pe baza unei analize teoretice profunde, a stabilit legile fundamentale ale structurii corpurilor cristaline și a arătat că în lumea cristalelor pot exista 230 tipuri diferite de simetrie. După 10 ani, în 1895, știința a înregistrat încă o mare victorie. În acest an, Wilhelm Konrad Roentgen a descoperit razele care au căpătat ulterior numele lui. Această descoperire remarcabilă a pus în mîinile oamenilor de știință un instrument puternic de cercetare a naturii, care a permis să se pătrundă adînc în structura materiei și să se elucideze în mod definitiv problema structurii cristalelor. Acest ultim fapt a devenit posibil în condiții reale în 1912, cînd — după ideea lui Laue — doi fizicieni tineri, Friedrich și Knipping au pus la cale o experiență care explica natura razelor Roentgen. Pe de altă parte, aceeași experiență arată că se poate studia structura corpurilor cristaline cu ajutorul razelor Roentgen. Prin lucrările lui W. H. Bragg și W. L. Bragg (tată și fiu) în Anglia și ale lui G. V. Vulf din Moscova, s-a descoperit că razele Roentgen permit să se determine foarte precis și foarte amănunțit structura unui cristal. Din acest moment, o ramură independentă și vastă a

științei — cristalografia — a făcut din tubul Roentgen un instrument de studiu principal și necesar.

Ce particularități diferențiază însă cristalul de un corp amorf? Dacă se vorbește numai despre criteriile pur exterioare, cristalele — spre deosebire de corpurile amorfe — se caracterizează prin forma lor, limitată de regulă de fațete plane naturale, care se intersectează una cu alta sub anumite unghiuri; datorită acestui fapt, orice cristal are forma unui poliedru, cel mai simplu dintre acestea fiind cubul.

Proprietățile fizice ale corpurilor amorfe nu depind de direcție. Dacă dintr-o masă de sticlă turnată, care constituie un corp tipic amorf, se taie un poliedru oarecare, de exemplu un paralelipiped, iar după aceea se măsoară conductivitatea, constanta dielectrică, coeficientul de conductibilitate termică, indicele de refracție sau oricare altă mărime fizică, de-a lungul unei axe a paralelipipedului, apoi de-a lungul altei axe, după aceea de-a lungul unei a treia axe etc., ne vom convinge de faptul că valorile numerice obținute vor fi absolut identice. Această particularitate a unor corpuri se numește izotropie, iar corpurile ale căror proprietăți nu depind de direcție se numesc izotrope.

Cu totul altă situație se observă la cristale. Spre deosebire de corpurile amorfe, cristalele sînt anizotrope. Aceasta înseamnă că unele proprietăți fizice ale cristalelor depind de direcție. Natural, pentru diferitele cristale, gradul de anizotropie este și el diferit. Anizotropia de cea mai mică proporție o posedă cristalul cubic. La majoritatea cristalelor, anizotropia se manifestă în modul cel mai evident în ce privește proprietățile lor mecanice.

Contrar corpurilor amorfe, cristalele se topesc la o temperatură anumită, trecînd în stare lichidă; la aceeași temperatură are loc și solidificarea lor.

Acestea sînt cîteva dintre deosebirile pur exterioare dintre cristale și corpurile amorfe.

Toate acestea, precum și alte proprietăți ale cristalelor, se explică printr-o particularitate a structurii lor. Cristalele posedă o structură internă ordonată. Particulele — atomi, ioni sau molecule — din care este alcătuit cristalul, formează o rețea spațială regulată, uniformă și periodică. O asemenea rețea se obține la intersecția a trei sisteme de plane, fiecare sistem fiind caracterizat prin faptul că toate planele lui componente sînt paralele unul cu altul și se află la egală distanță unul față de altul.

Particulele care formează cristalul sînt așezate în nodurile rețelei spațiale. Mișcarea termică a acestor particule se manifestă numai prin faptul că particulele-molecule, ioni sau atomi — săvîrșesc o mișcare vibratorie în jurul nodurilor, care — prin urmare — constituie centre de mișcare vibratorie termică. Dacă se face abstracție de mișcarea termică, adică nu se ține seama de ea, se poate considera că particulele cristalului sînt fixate în nodurile rețelei spațiale.

Între aceste particule există forțe de interacțiune, care depind de distanța dintre ele. La distanțe relativ mici, particulele se atrag una pe alta. Dacă ele se apropie mult, forțele de atracție se transformă în forțe de respingere. În orice cristal, particulele care îl formează se găsesc una de alta la o astfel de distanță, încît forțele de respingere sînt echilibrate de forțele de atracție și astfel întregul cristal reprezintă o formație rigidă. Caracterul ordonat și periodicitatea structurii cristalului, precum și caracterul determinat al legăturii dintre particule, asigură o „construcție” rațională a rețelei spațiale a cristalului. Dacă toate celelalte condiții sînt aceleași, cristalul se prezintă ca un corp solid ale cărui particule componente sînt „împachetate” în modul cel mai compact și mai rațional. Se înțelege că densitatea de „împachetare” este diferită pentru diversele cristale.

În funcție de natura particulelor din care este construit un cristal, se disting rețele cristaline moleculare, atomice, ionice și, respectiv, metalice.

Rețelele atomice sînt create în cazul cînd atomii care formează cristalul sînt legați între ei prin intermediul așa-numitelor perechi de electroni. Prin pereche de electroni trebuie să se înțeleagă doi electroni ce gravitează în jurul a două nuclee și care posedă energie identică și momente magnetice de sens opus. Fiecare electron poate fi considerat ca un magnet minuscule, care posedă o axă magnetică. În cazul de față, cînd perechea de electroni se va roti în jurul nucleelor, axele magnetice ale electronilor se vor așeza paralel una față de alta, iar polii lor de același nume vor fi atunci dirijați în sensuri opuse. Pentru simplitate, vom studia molecula de hidrogen H_2 . Fiecare atom de hidrogen constă dintr-un nucleu și un electron care se rotește în jurul acestuia din urmă. Cînd doi atomi de hidrogen se reunesc într-o moleculă, cei doi electroni vor începe să se rotească simetric în jurul ambelor nuclee. Într-un asemenea sistem, electronii —

fiind atrași de nuclee — parcă îi cimentează pe aceștia, nelăsându-i să se despartă (fig. 2).

La alte molecule, o legătură de acest fel poate fi realizată de către două, trei, sau chiar patru perechi de electroni.

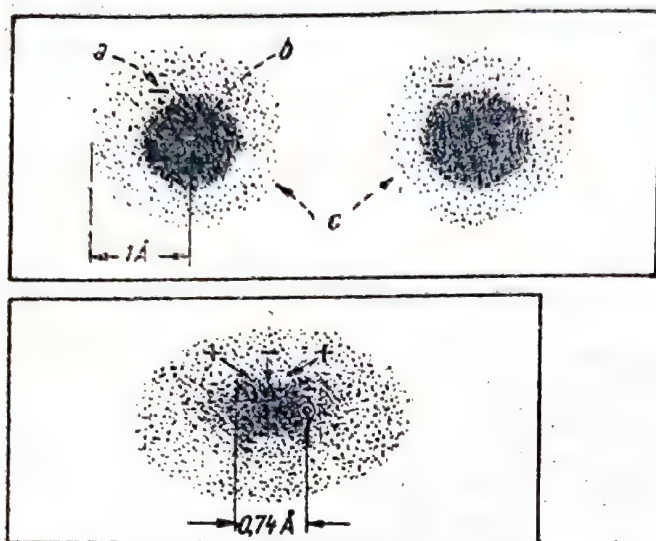


Fig. 2. Legătura electronică în molecula de hidrogen. Desenul de sus reprezintă schematic doi atomi de hidrogen izolați. În desenul de jos este arătată o moleculă de hidrogen. *a* — electron, *b* — nucleu; *c* — puncte care reprezintă densitatea sarcinilor electronilor.

(NaCl). Aici, cu cercelete negre sînt notați ionii de sodiu (Na^+), iar cu cercelete albe — ionii de clor (Cl^-). Examînd fig. 3, vedem că fiecare ion de sodiu este înconjurat de 6 ioni de clor, iar fiecare ion de clor de 6 ioni de sodiu.

De valoarea forțelor de interacțiune care leagă ionii unii de alții, depind unele proprietăți ale cristalului, cum sînt duritatea, solubilitatea și temperatura de topire. Cu cît forțele de interacțiune din ioni sînt mai puternice, cu atît temperatura de topire este mai înaltă și duritatea metalului este mai mare. În adevăr, natura fizică a procesului de topire constă în faptul că se rupe legătura dintre particulele ce formează cristalul. Firește, cu cît această legătură este mai puternică, cu atît este necesară o energie mai mare pentru

Rețelele ionice sînt formate din ioni opuși ca semn, fixați în nodurile lor. Un exemplu de cristale ionice pot fi: sarea de bucătărie (NaCl), clorura de cesiu (CsCl) și alți compuși. În nodurile rețelei ionice se amplasează alternat ioni pozitivi ai metalului și ioni negativi ai metaloidului. În acest caz, legătura dintre ioni se realizează prin forțele electrostatice descrise de legea lui Coulomb.

În fig. 3 este reprezentată schema rețelei clorurii de sodiu

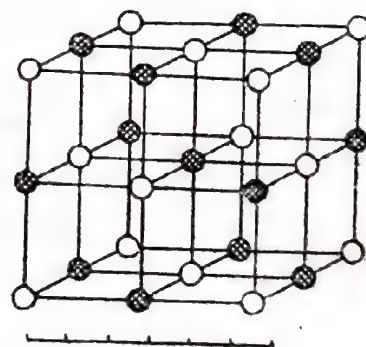


Fig. 3. Rețeaua cristalină a sării de bucătărie

învingerea ei și, în consecință, cu atât este mai mare temperatura pînă la care urmează a fi încălzit cristalul. Din acest punct de vedere se înțelege de ce un cristal se poate dizolva într-un lichid; dizolvarea se reduce și ea la ruperea legăturilor dintre ioni. În consecință, cu cît forțele de interacțiune dintre ionii rețelei sînt mai puternice, cu atât cristalul este mai puțin capabil de a se dizolva.

În nodurile rețelei spațiale a metalului se găsesc numai ionii pozitivi ai acestuia. Între ionii pozitivi există forțe de respingere mutuală, și nu de atracție; de aceea, s-ar părea că o asemenea rețea ar trebui să se distrugă, ceea ce — totuși — nu se observă. Acest fapt, de neînțeles la prima vedere, se explică prin aceea că în metal există electroni liberi. Interacționînd cu ionii pozitivi, electronii liberi asigură stabilitatea rețelei metalului, nu o lasă să se distrugă și nici ei nu pot ieși dintre granițele ei.

În nodurile unei rețele moleculare, moleculele sînt legate una de alta prin forțe relativ slabe, al căror mecanism de acțiune se reduce de asemenea la o interacțiune electrică.

Această interacțiune poate apărea în două cazuri. Primul are loc atunci cînd molecula este asimetrică în sens electric. Aceasta înseamnă că, indiferent dacă molecula în întregul ei este neutră, centrele de greutate ale sarcinilor pozitive și negative ale moleculei sînt deplasate unul față de altul. În cazul unei orientări corespunzătoare una față de alta, moleculele de acest fel vor începe să se atragă reciproc.

În al doilea caz, forța de atracție dintre molecule poate apărea chiar atunci cînd moleculele, nefiind polare prin natura lor, devin polare atunci cînd se apropie suficient de mult. Ca și în primul caz, polaritatea apare datorită faptului că centrele de greutate ale sarcinilor negative și pozitive ale moleculei se deplasează unul în raport cu altul. Rețele cristaline moleculare au cristalele de gheață și numeroase substanțe organice.

Acestea sînt, în linii mari, concepțiile fundamentale referitoare la legăturile din rețelele cristaline și la structura lor. Tipurile de legături considerate reprezintă cazuri limită. În cristalele reale există și toate tipurile de legături intermediare.

4. ELECTRONII DE CONDUȚIE

Semiconductoarele, pe care le studiază fizica modernă și cu care are de-a face tehnica, sînt substanțe cu structură cristalină. De aceea, toate legile mișcării sarcinilor electrice în substanțele semiconductoare sînt legate de particularitățile acestei structuri. Orice cristal este constituit din atomi, ioni sau molecule. Oricare dintre aceste particule reprezintă un sistem electric, format din nuclee și electroni. În consecință, în interiorul cristalului trebuie să existe cîmpuri electrice. Cînd atomii se află unul față de altul la distanțe mari, cum se întîmplă de exemplu în gazele rarefiate, interacțiunea lor electrică nu joacă un rol esențial. Într-un cristal, însă, atomii, moleculele sau ionii sînt așezați ordonat și se găsesc, unul față de altul, la distanțe suficient de mici. De aceea, cîmpurile electrice ale atomilor vecini se influențează reciproc. Aceasta duce la faptul că cîmpurile diferitelor particule ce formează un cristal oarecare se compun, iar deoarece particulele din cristal reprezintă un sistem ordonat și periodic, în interiorul rețelei cristaline se creează un cîmp electric periodic. În cazul unui cristal ideal, fără impurități, și cu rețea ideal regulată, în el trebuie să existe un cîmp electrostatic riguros periodic. În realitate, însă, nu există cristale ideale în natură și, din această cauză, periodicitatea cîmpului este de obicei perturbată în puncte izolate.

Într-o rețea cristalină au loc procese fizice complicate, care constituie cauza apariției unei serii întregi de fenomene. Totuși, înainte de a proceda la un studiu mai amănunțit al acestor procese, să descifrăm la început natura fizică a apariției conductibilității electrice în semiconductoare.

La fel ca și atomul unui metal, un atom de semiconductor este format dintr-un nucleu încărcat pozitiv și un număr oarecare de electroni care se rotesc în jurul lui. Așa dar, atomii de metale și de semiconductoare și, în general vorbind, atomii tuturor substanțelor, fără excepție, au aceeași alcătuire de principiu. Aici nu există nici un fel de deosebiri. În atomii semiconductoarelor, însă, toți electronii — chiar și cei mai îndepărtați de nuclee — sînt destul de bine legați de nucleele lor.

Acest fapt important arată de ce, în cazul unor temperaturi foarte joase, în semiconductoare nu există nici un fel de electroni liberi. Dar poate oare exista conductibilitate electrică în asemenea condiții? Firește, acest lucru este imposibil.

Pentru ca printr-o substanță să circule un curent electric, este necesar ca în această substanță să existe o mișcare dirijată a sarcinilor electrice, în cazul nostru — a electronilor. Dacă însă nu există asemenea sarcini, rezultă că nu poate exista nici curent. În consecință, orice semiconductor adevărat — la temperaturi foarte joase — este un material izolant care posedă o rezistență excesiv de mare.

S-ar părea că o substanță la care toți electronii sînt legați și nu există nici un electron liber, ar trebui să constituie un material izolant la orice temperatură. Totuși, în natură nu există asemenea substanțe. Orice substanță, chiar și cea mai bună dintre substanțele izolante pe care le cunoaștem, conduce în mod obligatoriu electricitate, într-o măsură mai mare sau mai mică, dar oricum conduce. Despre ce este oare vorba? De ce, la prima vedere, o concluzie absolut justificată, bazată pe ipoteze teoretice corecte, este în contradicție cu practica? Cauza constă în faptul că, emițînd ipoteza noastră, n-am ținut seama de mișcarea termică ce există pentru toate temperaturile ce pot fi atinse în practică.

După cum se știe, în procesul de mișcare termică, particulele care formează corpul (atomi și molecule) se ciocnesc în mod obligatoriu unele cu altele. În momentul unei ciocniri laterale puternice, dintr-un atom sau moleculă poate fi smuls un electron. În corp există însă nemaipomenit de multe particule, prin urmare și numărul de electroni eliberați în felul acesta va fi de asemenea relativ mare. Prin ce se deosebesc acești electroni eliberați de electronii liberi ai metalului? La drept vorbind, prin nimic. La fel ca și electronii liberi ai metalelor, electronii liberi din semiconductoare au deplina posibilitate de a se deplasa în întreg volumul acestuia. Dar care este soarta lor ulterioară? Ea nu se deosebește practic prin nimic de soarta electronilor liberi ai metalului. Și anume: pentru un timp oarecare, foarte scurt, ei vor rătăci absolut liber între limitele corpului, apoi vor fi atrași din nou de unii ioni pozitivi. În locul lor, vor apărea alți electroni, smulși din atomii semiconductorului, care vor fi complet liberi, etc. Nu este greu să se înțeleagă că acești electroni care s-au eliberat, numiți „electroni de conducție” sînt analogi — în ce privește comportarea lor — cu electronii liberi ai metalului. Dacă într-un semiconductor se creează o diferență de potențial, sub influența ei electronii de conducție vor începe să se deplaseze de la potențialul mai scăzut spre cel mai înalt, adică prin semiconductor va începe să circule un curent.

Prin urmare, în semiconductor se desfășoară simultan două procese: apariția electronilor de conducție și dispariția lor. Datorită acestor procese se realizează așa-numitul echilibru termic între numărul de electroni de conducție care apar, și numărul de electroni care sînt atrași de ioni. Ca rezultat al acestui echilibru, într-un semiconductor vor exista întotdeauna un număr oarecare de electroni de conducție. Ce rol joacă temperatura în aceste procese? Odată cu creșterea temperaturii, se mărește numărul de ciocniri dintre atomi și, în consecință, crește și numărul de electroni eliberați — adică de electroni de conducție. De aceea, o dată cu creșterea temperaturii, concentrația electronilor de conducție dintr-un semiconductor se mărește și invers, o dată cu scăderea temperaturii, ea se micșorează, anulîndu-se la o temperatură foarte joasă.

Din explicarea mecanismului apariției conductibilității electrice a semiconductorului rezultă o consecință fizică esențială, și anume că rezistența acestuia depinde mai ales de numărul de electroni de conducție. Cu cît numărul acestora este mai mare, cu atît rezistența este mai mică. Așa dar, spre deosebire de metale, rezistența semiconductoarelor se micșorează odată cu creșterea temperaturii, iar în cazul unei scăderi a temperaturii — se mărește.

Este natural să ne punem acum următoarea întrebare: este oare mișcarea termică unicul factor care asigură apariția electronilor de conducție într-un semiconductor? Se pare că există și alte posibilități. Deoarece conductibilitatea electrică a semiconductorului apare datorită faptului că unii electroni, care înainte erau legați, se eliberează, este suficient să se comunice electronilor energia necesară pentru desprinderea lor, pentru ca să apară conducția. În afară de mișcarea termică, această energie poate fi transmisă electronilor semiconductorului de către o radiație electromagnetică, de particule elementare cu energie suficient de mare, de un cîmp electric intens, etc. Încă în secolul trecut se descoperise că rezistența a numeroase semiconductoare se modifică considerabil în funcție de iluminarea lor. Acest fenomen, care a căpătat denumirea de efect fotoelectric interior, sau efect fotoconductiv, își găsește o explicație simplă și intuitivă. În adevăr, la o temperatură oarecare, într-un semiconductor aflat în obscuritate există un anumit număr de electroni de conducție n_i . Acești electroni condiționează conductibilitatea electrică obișnuită a substanței, numită altfel și conductibilitate de obscuritate. După ce

semiconductorul a fost supus unei iluminări, în el apar un număr suplimentar n_2 de electroni „de lumină”, cu alte cuvinte care au fost eliberați cu ajutorul luminii, iar numărul total de electroni de conducție nu va mai fi acum n_1 , ci $n_1 + n_2$. În legătură cu aceasta, și conductibilitatea electrică specifică a semiconductorului se va mări.

Un fenomen absolut analog se observă și în cazul cînd un semiconductor este iradiat cu particule: electroni, protoni, particule α ș. a. Particula care bombardează semiconductorul cedează energia ei unui electron. Dacă această energie este de o asemenea valoare, încît poate duce la ionizarea atomului, adică la smulgerea unui electron, acest electron va deveni liber și va putea participa la trecerea curentului electric prin semiconductor. Dacă energia particulei este mică, smulgerea electronului din atom nu va avea loc și conductibilitatea electrică a semiconductorului nu se va mări.

5. ELECTRONI ȘI GOLURI

În paragraful precedent s-a arătat că în rețeaua cristalină a semiconductorului se desfășoară procese fizice complexe cărora — printre altele — li se datorește și apariția conductibilității electrice a unui conductor. Mecanismul acestor procese poate fi înțeles din punctul de vedere al stărilor energetice posibile ale electronilor.

Toți electronii unui atom izolat posedă numai energii strict determinate. Experiențe foarte sigure au arătat că în fiecare atom nu pot exista mai mult decît doi electroni care să se afle în una și aceeași stare. Cînd N atomi de acest fel, apropiindu-se la distanțe mici, formează un corp cristalin solid, în interiorul rețelei cristaline apare un cîmp electric periodic. Cîmpurile electrice ale diferiților atomi ai cristalului au influență asupra valorii energiei electronilor, modificînd-o întrucît-va. Și dacă în atomii izolați, electronii se găseau în stări energetice determinate, într-un cristal aceste stări se schimbă într-o oarecare măsură. Deoarece în cristal există N atomi, din cauza influenței mutuale a cîmpurilor electrice ale acestor atomi, fiecare nivel de energie al atomului „se descompune” în N niveluri apropiate ca valoare, dar totuși diferite, pe fiecare dintre ele putîndu-se afla cîte doi electroni. Aceste N niveluri formează o fișie sau o zonă de energie. Zonele sînt despărțite una de alta prin domenii de energie

în care electronii nu se pot afla. Aceste domenii sînt numite „zone interzise”. La temperatura de zero absolut, toți electronii unui semiconductor ocupă cele mai scăzute niveluri de energie. La această temperatură, zonele de niveluri permise completate cu electroni, vor alterna cu zonele interzise.

Electronii cei mai apropiați de nucleu sînt legați atît de puternic de nucleeele lor, încît nu pot participa la conducția electrică. Aceasta este condiționată numai de electronii de valență, adică de electronii cei mai exteriori.

Electronii de valență, la fel ca și electronii așezați mai aproape de nucleu, la o temperatură apropiată de zero absolut, ocupă nivelurile permise cele mai scăzute. În afară de nivelurile ocupate, într-un cristal de semiconductor există și așa-numitele niveluri de excitație, adică niveluri cu valori mai mari ale energiei. Aceste niveluri la o temperatură apropiată de zero absolut sînt libere. Electronii pot trece de la nivelurile ocupate inițial la nivelurile de excitație numai în cazul cînd pentru acest scop li se va comunica energia suplimentară necesară.

Să examinăm structura zonelor energetice ale unui corp solid. Caracterul acestei structuri va depinde în mare măsură de materialul cu care avem de-a face: metal sau semiconductor. În primul caz, *în imediata vecinătate* a zonei principale se găsește o zonă cu niveluri excitate. Aceste zone se pot suprapune parțial. În apropierea temperaturii de zero absolut, zona principală este umplută în întregime cu electroni, iar zona de niveluri excitate, aflată în imediata ei apropiere sau care se suprapune parțial cu ea, este liberă. De aceea, electronii din zona principală au în principiu posibilitatea de a trece de la unele niveluri la altele mai înalte. Această trecere nu se produce de la sine. Dacă se aplică însă corpului un cîmp electric exterior, sub influența acestuia electronii vor începe să se deplaseze dirijat, schimbîndu-și în acest caz energia și trecînd la niveluri mai înalte. Ca rezultat, va apărea conducția.

Să analizăm acum structura zonelor de energie ale electronilor de valență ai unui semiconductor, reprezentată schematic în fig. 4. La temperatura de zero absolut, ultima zonă completă 1 este umplută în întregime cu electroni de valență. După aceea urmează o zonă interzisă, iar deasupra se găsește zona liberă 2, care a căpătat denumirea de „zonă de conducție”. Pentru ca să apară conductibilitatea electrică, este necesar ca un număr oarecare de electroni să treacă din

zona umplută complet (numită zona ocupată) în cea liberă, unde ei s-ar putea deplasa sub acțiunea câmpului electric exterior. În caz contrar, chiar dacă ar exista un câmp electric, conducția nu ar putea apărea, deoarece în zona de energie umplută complet electronii nu și-ar putea schimba starea. În cazul cel mai bun, ei și-ar putea schimba „locurile”. Acest schimb nu are însă nici o influență asupra stării generale a electronilor. Pentru ca în semiconductor să apară un curent, este necesar ca o parte din electronii din zona principală să treacă în zona superioară de niveluri excitate. Pentru ca un



Fig. 4. Schema zonelor energetice ale electronilor de valență ai unui semiconductor

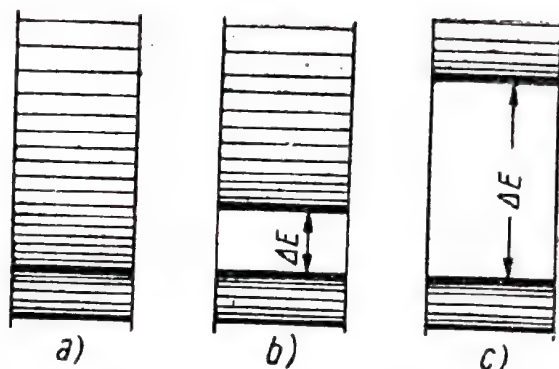


Fig. 5. Structura energetică a spectrului electronilor de valență ai unui metal, unui semiconductor și unui izolant

electron să poată însă săvârși trecerea în zona liberă, este necesar să i se comunice o cantitate oarecare de energie ΔE . Deplasarea electronilor spre niveluri de energie mai înalte este imposibilă fără a se absorbi energie din exterior și, în consecință, nu este posibilă nici apariția curentului electric. Prin urmare, existența unei zone energetice interzise cu „lățimea” ΔE , unde mărimea ΔE — pentru diferite semiconductoare — are valori de la câteva zecimi de electron-volt până la 1,5 eV, deosebește semiconductorul de metal.

Din punctul de vedere al acestor concepții, devine evident răspunsul la întrebarea ce sînt materialele izolante. Materialele izolante sînt substanțe care se caracterizează prin faptul că „lățimea” ΔE a zonei interzise, are o valoare relativ mare — de la 1,5 pînă la cîțiva electroni-volți (fig. 5). Ca o concluzie logică, dintr-un asemenea raționament rezultă că este imposibil să se traseze o limită de separație netă între semi-

conductoare și materialele izolante, numai în funcție de mărimea ΔE . În multe privințe, acest criteriu este însă cât se poate de caracteristic și joacă un rol important în teoria semiconductoarelor.

Prin urmare, numai un metal (fig. 5 a) posedă întotdeauna — în orice condiții — o conductibilitate electrică bună. Materialele izolante și semiconductoarele au o rezistivitate foarte mare la o temperatură apropiată de zero absolut. S-ar părea că și semiconductoarele (fig. 5 b), chiar la temperatura camerei, ar trebui să conducă foarte slab curentul, din cauza existenței zonei interzise ΔE . În realitate, se observă însă o altă situație, ale cărei cauze fizice vor fi examinate mai jos.

Prezența zonelor de energie permite să se înțeleagă mecanismul conductibilității electrice a semiconductoarelor. Pentru ca un electron să poată trece dintr-o zonă completă în zona de conducție, energia lui trebuie mărită cu cantitatea ΔE . La majoritatea semiconductoarelor, valoarea numerică a mărimii ΔE este cuprinsă între limitele 0,1—1 eV. De unde, de la ce surse poate căpăta electronul această energie? Există multe asemenea surse și am vorbit deja despre ele. Sursa principală este mișcarea termică a atomilor substanței semiconductoare. La temperaturi obișnuite, energia termică medie a unei particule nu depășește 0,04 eV, în timp ce cantitatea de energie care este necesară să fie absorbită pentru ca un electron legat al semiconductorului să poată deveni un electron de conducție, este de aproximativ 30 de ori mai mare. De aici ar rezulta că mișcarea termică nu este capabilă să treacă electroni din zona ocupată în zona de conducție. Lucrurile nu stau însă astfel. Este vorba de faptul că mișcarea termică este un proces haotic, care posedă caracter statistic, adică un proces la care participă un număr colosal de particule. Un asemenea proces, ca de altfel și oricare alt proces la care iau parte un număr foarte mare de obiecte, prezintă întotdeauna fluctuații, adică abateri de la uniformitate, de la valoarea medie. Aceste fluctuații, care există la orice temperatură, condiționează existența unui număr oarecare de atomi cu energiile termice de ordinul a 1 eV și chiar mai mult. Atomii de acest fel, la ciocnirea cu electronii legați vecini, le pot transmite energia lor, cu totul suficientă pentru ca un asemenea electron să treacă în zona de conducție.

Dacă nu ar exista fluctuații termice, care să atingă valori și mai mari decât un electron-volt, majoritatea semiconductoarelor pure nu ar conduce deloc pînă la temperatura lor de

topire. Odată cu creșterea temperaturii, mișcarea termică devine mai intensă, numărul de fluctuații se mărește, iar odată cu el devine mai mare și numărul de electroni de conducție. Invers, o dată cu scăderea temperaturii numărul de fluctuații se micșorează, iar simultan devine mai mic și numărul de electroni de conducție, ajungînd pînă la zero la temperatura de zero absolut.

La descrierea procesului fizic de apariție a conductibilității electrice a semiconductoarelor a trebuit să se introducă noțiuni și termeni noi. În legătură cu aceasta vom face două observații. Cînd se vorbește sau se scrie despre semiconductoare, se amintesc în mod inevitabil zonele de energie, adică zonele de conducție, zonele interzise și cele ocupate. Aceste noțiuni sînt cît se poate de clare pentru un fizician și el știe cu ce are de-a face; pentru un cititor neexperimentat, însă, aceste noțiuni duc uneori la confuzii. Adesea, cititorii care nu sînt fizicieni ca specialitate, capătă impresia eronată că un cristal este un corp compus chipurile din zone de energie: ocupate, interzise și de conducție. În realitate nu există nimic asemănător. Introducerea zonelor de energie constituie o interpretare teoretică care este, fără îndoială, justificată. Trebuie să se amintească însă că această noțiune reflectă numai starea energetică a electronilor dintr-un corp solid. Corpul solid însuși nu este alcătuit cîtuși de puțin din zone, ci din particule-atomi, ioni sau molecule — care formează rețeaua cristalină. Cînd vorbim despre electronii dintr-o zonă ocupată sau liberă, nu avem în vedere în acest caz nici un fel de electron care s-ar găsi în zone ce au dimensiuni geometrice spațiale. Cînd este vorba de electronii dintr-o zonă ocupată sau liberă, aceasta înseamnă că arătăm numai faptul că acești electroni posedă energii ale căror valori extreme sînt determinate de limitele zonelor.

Cînd vorbim despre „trecerea“ electronilor dintr-o zonă ocupată în zona de conducție, trebuie să se aibă în vedere că o asemenea formă de exprimare, cu totul convențională, nu înseamnă în realitate altceva decît că electronii, în locul energiei anterioare, limitată de valoarea superioară a zonei ocupate, au căpătat acum o energie mai mare, a cărei valoare minimă corespunde în sistemul nostru de coordonate tocmai înălțimii la care se află limita inferioară, sau „fundul“ zonei de conducție. În ce privește electronii înșiși, din zonele ocupate și libere, ei sînt în realitate distribuiți în întregul volum al rețelei cristaline. Electronii de pe orbitele interioare

sînt legați de atomii lor. Electronii de valență, însă, sînt legați fie de atomii lor, fie — dobîndind o energie corespunzătoare unor valori mai mari decît valoarea limitei inferioare a zonei libere — devin, datorită acestui fapt, electroni de conducție și încep să rătăcească prin întreg volumul corpului.

Din toate acestea rezultă că trecerea unui electron dintr-o zonă ocupată în una liberă nu înseamnă altceva decît smulgerea electronului din atomul propriu. Prin urmare, unul și același fenomen fizic poate fi exprimat într-o formă deosebită, folosind cuvinte diferite. În procesul mișcării termice, atomii se ciocnesc unul cu altul. În acest caz, unii dintre ei își pierd electronii, care capătă posibilitatea de a rătăci liber prin întreg volumul corpului și, în consecință, de a deveni electroni de conducție. Această descriere cît se poate de clară și inteligibilă a procesului care se desfășoară într-un corp solid, poate fi redată în alte cuvinte, folosind noi noțiuni „zonele de energie”. Un electron legat de un atom este un electron, „care se află” într-o zonă ocupată. Acest electron nu participă la formarea curentului electric. Un electron care și-a părăsit atomul propriu este un electron care „a pășit” în zona de conducție. Un asemenea electron participă direct la formarea curentului electric, deci condiționează conductibilitatea electrică a corpului solid.

După aceste observații, vom trece din nou la explicarea mecanismului conductibilității electrice a semiconductoarelor. Factorul hotărîtor care determină conductibilitatea lor electrică este existența mișcării termice. Numeroase date experimentale arată însă convingător că în afară de acest factor, asupra valorii conductibilității electrice a unui semiconductor are o influență dintre cele mai puternice introducerea în semiconductor a unor impurități (adaosuri), adică a unor atomi de alte elemente. Introducerea într-un semiconductor a unei cantități infime de adaosuri mărește extraordinar de mult, uneori de zeci de milioane de ori, conductibilitatea semiconductoarelor. În metale se observă o situație absolut inversă: introducerea unor adaosuri micșorează valoarea conductibilității electrice a metalelor. Analiza amănunțită a rolului adaosurilor a arătat că mecanismul conducției electrice este determinat, în linii generale, tocmai de atomii adaosurilor. Mai mult încă, s-a descoperit că în natură practic nu există semiconductori complet puri, ci se întîlnesc — în special — numai semiconductoare cu impurități. Pentru a explica influența impurităților, vom studia structura energetică a unui semi-

conductor, reprezentată schematic în fig. 6. În cazul unui semiconductor absolut pur, furnizorul de electroni pentru zona de conducție este zona ocupată. În acest caz este necesar ca energia electronilor să fie mărită cu cantitatea ΔE . Să introducem acum în semiconductor un adaos care mărește de mai multe ori conductibilitatea electrică a substanței. Creșterea de mai multe ori a conductibilității electrice δ poate însă însemna o creștere identică a numărului de electroni de conducție. Pe de altă parte, se știe că creșterea numărului de electroni din zona de conducție poate avea loc, în primul rând, datorită creșterii temperaturii, iar în al doilea rând — din cauza micșorării lățimii zonei interzise ΔE . Ultima împrejurare este cât se poate de clară din punct de vedere fizic. În adevăr, cu cât ΔE este mai mic, adică cu cât este mai mică energia care trebuie comunicată electronului pentru ca el să treacă dintr-o zonă ocupată în zona de conducție, cu atât va fi mai mare numărul de electroni care vor reuși — dacă toate celelalte condiții sînt identice — să ajungă acolo. Deoarece în cazul considerat de noi temperatura nu variază, rămîne să se presupună că introducerea adaosurilor favorizează într-un mod oarecare trecerea electronilor în zona de conducție.

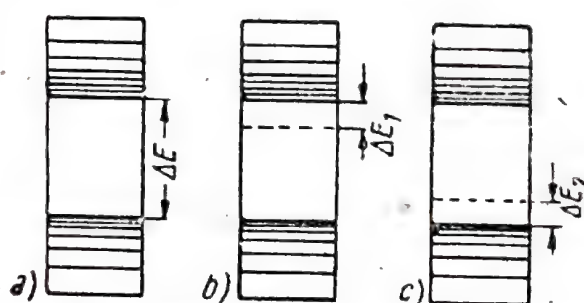


Fig. 6. Nivelurile de energie ale adaosurilor dintr-un semiconductor:
a — semiconductor fără adaosuri, b — niveluri donoare, c — niveluri acceptoare

Comparînd un mare număr de date experimentale, fizicienii au ajuns la concluzia că nivelurile de energie ale electronilor adaosurilor de un anumit fel sînt așezate în apropierea zonei de conducție, ajungînd în felul acesta în interiorul zonei interzise. Fiînd surse de electroni care trec în zona de conducție, atomii adaosurilor cedează ușor acești electroni, deoarece nivelurile lor de energie au o valoare mai mare decît nivelurile de energie ale electronilor din zona ocupată. În consecință, pentru trecerea într-o zonă liberă, electronii impurităților trebuie să-și mărească energia cu valoarea ΔE_1 , despre care se știe că este mai mică decît ΔE . La temperatura de zero absolut, nivelurile adaosurilor de acest fel sînt completate în întregime, iar la temperaturi mai mari decît zero absolut ele cedează electronii lor în zona liberă și anume

cu atît mai intens, cu cît temperatura substanței este mai înaltă.

Nivelurile energetice ale adaosurilor, care sînt complet ocupate la temperatura de zero absolut și își cedează electronii în zona liberă la temperaturi diferite de zero absolut, se numesc niveluri donoare, iar adaosurile înșile se numesc adaosuri donoare *) (fig. 6 b).

Există de asemenea adaosuri cu totul de altă natură, care au căpătat denumirea de acceptoare. Spre deosebire de nivelurile donoare, cele acceptoare sînt așezate în apropierea unei zone ocupate (fig. 6 c). La temperatura de zero absolut nivelurile acceptoare sînt libere, adică nu sînt ocupate. În consecință, la temperaturi diferite de zero absolut, la acest nivel pot sosi electroni din zona ocupată. Este cît se poate de evident faptul că dacă există mișcarea termică a atomilor și electronilor și dacă există în mod obligatoriu fluctuații termice, acestea din urmă — după toate probabilitățile — vor muta electronul din zona ocupată la nivelul acceptor al adaosurilor, la fel cum l-ar duce zona liberă. Dece? Fiindcă $\Delta E_2 < \Delta E$ și la temperatura T , la nivelurile adaosurilor vor sosi un număr considerabil mai mare de electroni decît în aceleași condiții în zona liberă. Cu cît temperatura T este mai înaltă, cu atît este mai mare numărul de electroni care va pleca din zona ocupată ajungînd la nivelurile acceptoare ale adaosurilor. Plecarea electronilor din zona ocupată dă însă posibilitatea electronilor care au rămas acolo să participe și ei la procesul de conducție. În adevăr, dacă în zona ocupată vor apărea niveluri libere din cauza plecării electronilor de acolo, este natural că la aceste niveluri vor începe să sosească — sub acțiunea cîmpului electric exterior — alți electroni din aceeași zonă. Prin urmare, plecarea parțială a electronilor din zona ocupată condiționează posibilitatea reală a deplasării electronilor care au rămas în acea zonă, de la niveluri relativ joase la niveluri mai înalte și, invers, de la niveluri mai înalte la altele mai joase, între limitele acestei zone, care pînă atunci era ocupată complet cu electroni. Dar care sînt urmările faptului că devine posibilă deplasarea electronilor în zona ocupată? Dacă în zona liberă sau la nivelurile adaosurilor acceptoare au ajuns, din zona ocupată, un număr oarecare de electroni, în acea zonă vor rămîne exact

*) Trebuie observat că în unele lucrări nu se utilizează termenul de *adaos*, ci de *impuritate*.

același număr de locuri libere, adică de niveluri neocupate. Existența acestor niveluri „vacante” face ca electronii rămași în zona ocupată să capete posibilitatea de a se deplasa între limitele acestei zone. Să admitem că de la un nivel oarecare A al zonei ocupate a plecat un electron. Atunci, în locul nivelului ocupat apare un nivel liber, vacant, sau un „gol”, termen care nu este tocmai adecvat. Acest gol se umple imediat cu un electron vecin oarecare, cel mai apropiat, dar în locul de unde a plecat acest electron vecin se formează un nou loc gol, care la rândul lui va fi umplut de un alt electron oarecare. Acest electron va lăsa și el în urmă un gol, etc.

Să ne imaginăm că semiconductorului i se aplică o diferență de potențial. Ce se întâmplă în acest caz? Sub influența câmpului electric, electronii din zona ocupată vor începe să se deplaseze în sens invers câmpului electric. În cazul unei asemenea deplasări preferențiale a electronilor, golurile — după toate probabilitățile — vor fi umplute tocmai cu acei electroni, care se apropie de ele sub acțiunea câmpului. Dar acești electroni vor lăsa în urmă noi goluri, care de asemenea vor fi umplute cu electroni ce se deplasează în sens invers câmpului. Ca rezultat al acestui proces, în semiconductorul care se găsește într-un câmp electric, electronii se vor deplasa de la polul pozitiv la cel negativ, în timp ce golurile se vor mișca în sens invers. În consecință, dacă într-un semiconductor electronii — sub acțiunea unei diferențe de potențial — se deplasează de pildă de la stînga spre dreapta, golurile se vor deplasa de la dreapta spre stînga. Acestea sînt caracteristicile mișcării golurilor și electronilor într-un câmp electric.

Să încercăm acum să înțelegem mai profund ce înseamnă un gol. Evident, dacă dintr-un loc oarecare al unei rețele cristaline a plecat un electron, proces în urma căruia în acel loc a apărut un gol, acest fapt este echivalent cu a spune că în locul respectiv și-a făcut apariția o sarcină pozitivă. În adevăr, orice insuficiență de electroni într-un corp anterior neutru este echivalentă cu un surplus cantitativ identic de sarcini pozitive. Așa dar, orice gol se comportă ca și cînd el ar fi o sarcină pozitivă.

În realitate, într-un semiconductor se vor deplasa numai electronii, dar în exterior mișcarea electronilor se va manifesta în mod diferit, în funcție de care electroni participă — sub acțiunea câmpului — la mișcarea dirijată. Dacă curentul electric este realizat numai de electronii din zona ocu-

pată, ceea ce se observă într-un semiconductor cu adaosuri acceptoare, mișcarea purtătorilor corespunde unei mișcări de sarcini pozitive. În cazul când diferența de potențial este aplicată unui semiconductor cu adaosuri donoare, purtători de curent vor fi numai electronii care se găsesc în zona liberă.

Prin urmare, sînt posibile două tipuri de conducție electrică: electronică și prin goluri. Primul corespunde deplasării electronilor în zona liberă, cel de-al doilea — mișcării electronilor sau golurilor pozitive în zona ocupată. Primul tip este provocat de adaosuri donoare, iar cel de-al doilea — de adaosuri acceptoare.

Dar care este mecanismul conducției ce apare într-un semiconductor pur, fără adaosuri, care posedă o rețea cristalină ideală? Sub acțiunea fluctuațiilor termice, electronii din zona ocupată sînt aruncați în zonă liberă, adică în zona de conducție, în care ei se comportă aproximativ la fel cu electronii liberi ai unui metal. S-ar părea, la prima vedere, că în acest caz avem de-a face cu un mecanism de conducție tipic electronic. O asemenea concluzie ar fi însă pripită. În adevăr, simultan cu trecerea electronilor din zona ocupată în zona de conducție, în prima apar goluri capabile de a se deplasa sub acțiunea cîmpului electric, dînd naștere în felul acesta unui curent de goluri. Firește, în aceste condiții, numărul electronilor de conducție va corespunde exact numărului de goluri. Dacă se aplică apoi unui semiconductor pur de acest fel un cîmp electric exterior, sub acțiunea lui electronii de conducție se vor deplasa în sens invers cîmpului, creînd un curent de electroni, iar golurile vor începe să se miște în sensul cîmpului, formînd curentul de goluri. În consecință, curentul total dintr-un asemenea semiconductor va fi compus din doi curenți: unul electronic și altul de goluri, iar valoarea lui va fi

$$I = I_{el} + I_{gol}.$$

Dar

$$I_{el} = n_{+} e u_{-} S E$$

și

$$I_{gol} = n_{+} e u_{+} S E$$

În consecință,

$$I = n_{-} e u_{-} S E + n_{+} e u_{+} S E,$$

unde n_+ și n_- sînt concentrația golurilor și, respectiv, a electronilor ;

e — sarcina electronului și a golului ;

u_+ și u_- — mobilitatea golurilor și, respectiv, a electronilor, adică vitezele lor medii de deplasare sub influența unui cîmp electric de 1 V/cm ;

E — intensitatea cîmpului electric ;

S — aria secțiunii transversale a semiconductorului.

Partea electronică a curentului total I nu este egală cu cea de goluri, adică $I_e \neq I_{gol}$. În ciuda egalității depline a concentrațiilor electronilor și golurilor, curentului electronic I_e este totuși mai mare decît curentul de goluri I_{gol} . Aceasta se întîmplă datorită faptului că, în majoritatea cazurilor, mobilitatea electronilor este ceva mai mare decît mobilitatea golurilor și, de aceea, componenta electronică a curentului I va predomina asupra componentei sale de goluri. Tocmai de aceea un semiconductor pur, fără adaosuri, prezintă un mecanism de conducție electronică puțin accentuat.

Menționăm în treacăt că conducția observată la semiconductoarele fără adaosuri, se numește conducție proprie, iar aceste semiconductoare sînt numite semiconductoare intrinsece. Conducția condiționată de adaosuri se numește însă conducție prin adaosuri (sau extrinsecă), iar semiconductoarele care posedă adaosuri au căpătat denumirea de semiconductoare cu adaosuri.

Semiconductoarele cu adaosuri donoare se numesc electronici sau semiconductoare n . Semiconductoarele cu adaosuri acceptoare se numesc cu goluri, sau semiconductoare p . Aceste litere provin de la sarcina „negativă” a electronului și sarcina „pozitivă” a golului.

În fiecare substanță semiconductoră reală, caracterul conducției este de fapt determinat de temperatura semiconductorului : în cazul unor temperaturi suficient de scăzute, conductibilitatea electrică este condiționată mai ales de impurități. Pe măsură ce se mărește temperatura, crește numărul de fluctuații capabile de a arunca — în zona liberă — un număr mai mare de electroni din zona inferioară. În fine, în cazul unor temperaturi suficient de înalte, intră în funcțiune complet conductibilitatea proprie (intrinsecă) a substanței.

Studiind influența adaosurilor (impurităților) asupra mecanismului conducției în semiconductoare, nu se poate să nu observăm că rolul de impurități este îndeplinit nu numai de atomii unor substanțe străine. Același efect apare și în cazul când „impurități” sînt chiar atomii elementelor care formează un compus semiconductor oarecare. Numai că în acest caz este necesar să existe un număr suplimentar de atomi ai unui element component, peste raportul determinat de formula chimică a semiconductorului respectiv. Totodată, în majoritatea cazurilor, existența unui număr de atomi suplimentari de metal duce la o conducție electronică, în timp ce un număr suplimentar de atomi de metaloid atribuie semiconductorului o conducție prin goluri. Astfel, de exemplu, în cazul sulfurii de taliu (Tl_2S) surplusul de taliu condiționează o conducție electronică, iar surplusul de sulf — o conducție prin goluri; la sulfura de plumb (PbS), surplusul de plumb provoacă o conducție electronică, iar surplusul de sulf — o conducție prin goluri etc. Deși această regulă nu poate fi extinsă la toate semiconductoarele, totuși ea este satisfăcută cu suficientă rigurozitate de către multe substanțe.

6. SEMICONDUCTOARE ÎN CIMPURI ELECTRICE PUTERNICE

Legea lui Ohm, descoperită de fizicianul german Ohm în 1827, este valabilă absolut pentru toate metalele, fără excepție. Între altele, ea reflectă faptul că rezistivitatea ρ a metalelor nu depinde de diferența de potențial aplicată unui conductor metalic. Pentru fiecare metal, ρ este o mărime care depinde numai de temperatură. O altă situație se observă însă la substanțele semiconductoare. Cercetările efectuate de diferiți oameni de știință au stabilit că în cazul semiconductoarelor legea lui Ohm se păstrează numai pînă la o anumită limită, deasupra căreia ea nu mai este respectată. Nerespectarea acestei legi clasice este legată de faptul că rezistivitatea ρ a semiconductoarelor nu rămîne o mărime constantă în întreg intervalul de tensiuni aplicate, ci începînd de la o valoare oarecare E_c , a intensității cîmpului electric, începe să scadă odată cu creșterea ulterioară a intensității cîmpului.

Studiul experimental amănunțit al acestei particularități a comportării semiconductoarelor a arătat că pînă la o anumită valoare a intensității cîmpului electric aplicat semiconductorului, concentrația n a purtătorilor de curent — elec-

troni sau goluri — rămâne constantă. De aceea, odată cu creșterea intensității E a câmpului electric se mărește numai viteza medie v a mișcării dirijate a purtătorilor. O asemenea variație a lui v în funcție de E duce la o creștere liniară a intensității câmpului electric odată cu creșterea lui E (fig. 7). Dacă pe axa ordonatelor se notează intensitatea I a curentului, iar pe axa absciselor — intensitatea E a câmpului electric, graficul care exprimă variația lui I în funcție de E , între limitele intervalului $O - E_{cr}$ va fi o linie dreaptă. Această porțiune rectilinieară ilustrează faptul că, în semiconductorul considerat, legea lui Ohm este valabilă între limitele de la O până la E_{cr} și că viteza medie dirijată v a purtătorilor de curent, crește liniar odată cu creșterea lui E .

Intensitatea I a curentului care circulă prin semiconductor se determină cu următoarea formulă :

$$I = neuSE$$

unde n este concentrația sarcinilor :

e — valoarea unei sarcini;

u — mobilitatea sarcinilor ;

S — aria secțiunii transversale a semiconductorului ;

E — intensitatea câmpului electric.

Până la o anumită limită, adică până la momentul când E atinge valoarea E_{cr} mărimea n este constantă. Între aceleași limite produsul neS este și el o mărime constantă. Să notăm această mărime cu litera B . În acest caz, expresia precedentă pentru curentul I va căpăta forma :

$$I = Bv,$$

unde $v = uE$, adică va reprezenta ecuația unei drepte. În momentul când E atinge valoarea E_{cr} concentrația n a sarcinilor va înceta să mai fie o mărime constantă și va începe să crească odată cu creșterea ulterioară a câmpului electric. Creșterea lui n duce la o scădere a rezistivității ρ a semiconductorului care, în cazul unor câmpuri electrice suficient de puternice, se poate micșora de mai multe ori.

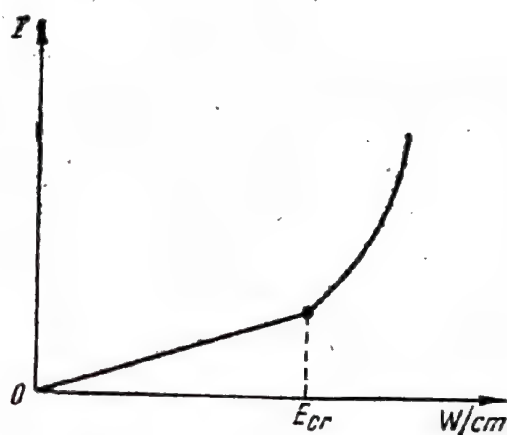


Fig. 7. Variația intensității curentului în funcție de intensitatea câmpului electric dintr-un semiconductor

Acest fenomen — scăderea bruscă a rezistivității semiconductorului când acestuia i se aplică o diferență mare de potențial — și-a găsit aplicații practice. Pe acest fenomen se bazează construcția rezistențelor neliniare — așa — numitele varistoare.

Pentru un număr considerabil de substanțe semiconductoare, valoarea lui E_{cr} variază în jurul a 10 000 V/cm.

7. REDRESAREA

Dacă o plăcuță de cupru este încălzită în aer, timp de câteva minute, la temperatura de 1020...1040°C, ea se va acoperi cu un strat de oxid de cupru (Cu_2O). Se poate face în așa fel, încât stratul de oxid să acopere numai o parte a plăcuței. În acest scop, oxidarea se efectuează în modul următor. Pe o placă-suport masivă din cupru, cu grosimea de 4—5 mm, se așază plăcuțe subțiri de cupru, cu o parte care trebuie să fie oxidată. În mod obișnuit, plăcuțele de cupru de acest fel sînt confecționate sub forma unor discuri. După aceea, suportul împreună cu discurile de cupru așezate pe el se introduce într-un cuptor electric, încălzit în prealabil pînă la temperatura necesară. În cuptor are loc procesul următor. Toate părțile exterioare ale discurilor de cupru se acoperă, după 10—15 minute, cu un strat relativ gros de oxid de cupru; în ce privește părțile acoperite, ele nu se vor oxida aproape deloc, deoarece discurile aderă bine la suprafața suportului, iar oxigenul care se găsește în aer nu poate pătrunde decît extrem de greu la ele.

Un asemenea disc de cupru cu strat de oxid de cupru, după cum se dovedește, posedă proprietăți absolut surprinzătoare.

Să depunem pe suprafața oxidului de cupru un strat subțire de metal, de exemplu argint. Să alcătuim apoi un circuit electric: de la polul negativ al unei baterii vom duce un conductor la un galvanometru, iar de la acesta — la suprafața de cupru a discului; polul pozitiv al bateriei îl vom lega la electrodul metalic superior, adică la stratul de argint (fig. 8). Prin acest circuit închis va circula un curent. Notăm indicațiile galvanometrului. Să schimbăm acum polaritatea, adică să conectăm stratul de argint la polul negativ al bateriei, iar polul pozitiv — la suprafața de cupru. Ne uităm din nou la acul galvanometrului. Observăm că el de-abia, de-a-

bia a deviat din poziția lui de zero, adică intensitatea curentului electric care circulă prin plăcuța de cupru pe care este depus un strat de oxid de cupru s-a micșorat considerabil. Dacă dorim să calculăm această scădere, vom constata că curentul care circulă într-un sens este de multe ori mai mic decât curentul care circulă în sens invers. De aici rezultă că discul de cupru cu strat de oxid de cupru posedă o așa-numită conductibilitate electrică unidirecțională, adică permite trecerea curentului într-un sens și nu o permite aproape deloc în sens contrar. La început, fizicienii n-au putut să elucideze cauzele acestei proprietăți a plăcuței de cupru oxidate, ea părându-le cu totul neobișnuită, și de-abia mult mai târziu a fost lămurită natura acestui fenomen.

Materialul experimental vast și concepțiile teoretice moderne bazate pe el, au arătat că — dacă se respectă anumite

condiții — un sistem de două semiconductoare care vin în contact, unul electronic iar celălalt cu goluri, posedă proprietatea de a redresa curentul alternativ. Într-un asemenea sistem, redresarea apare deoarece în cazul atingerii a două semiconductoare, unul electronic și celălalt cu goluri, la limita de separație dintre ele și parțial și în interiorul lor, se formează un strat foarte subțire, care a căpătat denumirea de „strat de blocare” *). Grosimea acestui strat este de ordinul 10^{-5} — 10^{-6} cm. Stratul de blocare posedă o proprietate remarcabilă: în funcție de sensul curentului care circulă prin el, rezistența lui devine când foarte mare, când foarte mică. Este cât se poate de clar că un sistem format dintr-un semiconductor electronic, unul cu goluri și un strat de blocare, introdus într-un circuit de curent alternativ, va lăsa să treacă curentul practic numai într-un singur sens și aproape deloc în sens invers. În consecință, un sistem de acest fel poate fi folosit drept redresor, adică drept dispozitiv care transformă curentul alternativ în curent continuu.

Pentru a se înțelege mecanismul formării stratului de blocare și rolul lui în procesul de redresare, să studiem acele procese fizice, care se produc în cazul când un semiconductor cu goluri este în contact cu unul electronic.

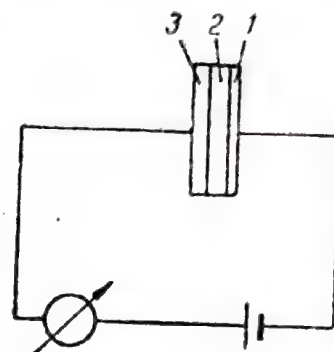


Fig. 8. Redresorul cu oxid cupros într-un circuit electric:

1 — electrod metalic superior, 2 — strat de Cu_2O , 3 — electrod inferior

*) Se mai utilizează și denumirea de „strat de baraj”.

Cînd două corpuri diferite se ating unul cu altul, la capetele lor libere se observă o oarecare diferență de potențial, a cărei valoare nu depinde cîtusi de puțin de forma și dimensiunile geometrice ale acestor corpuri și este determinată numai de natura lor fizică. Această diferență de potențial a căpătat numele de „diferență de potențial de contact”. Cum se formează ea? Pentru a înțelege acest lucru, este necesar să se spună la început cîteva cuvinte despre împrejurările în care un electron poate părăsi corpul în care se află. Găsindu-se în interiorul volumului unui corp oarecare, electronii liberi interacționează cu alți electroni vecini și cu nucleele încărcate pozitiv ale atomilor. Deoarece în interiorul substanței electronii și nucleele atomice sînt distribuite, în medie, absolut uniform, forțele de interacțiune dintre ei sînt dirijate în cele mai diverse direcții și se compensează una pe alta. Alta este însă situația cînd electronul se găsește chiar la suprafața corpului. În acest caz, forțele de interacțiune sînt îndreptate spre interior. Ele tind să mențină electronul în interiorul substanței. De aceea, pentru a scoate electronul în afara corpului, este necesar să se efectueze un lucru mecanic oarecare pentru învingerea acestor forțe „superficiale”. Valoarea lucrului mecanic amintit, care a căpătat denumirea de „lucru de ieșire” al electronului, este diferită pentru diversele substanțe și, pentru elementele pure din tabloul lui Mendeleev, variază aproximativ între 2 și 5 eV.

Cînd corpurile se găsesc la temperatura camerei sau la temperaturi încă și mai scăzute, electronii liberi nu pot părăsi corpul prin forțe proprii și ieși în spațiul înconjurător. Acest lucru este împiedicat de „forțele superficiale”. Găsindu-se în asemenea condiții de temperatură, electronii posedă în medie o energie care nu este suficientă pentru învingerea acestor forțe. O dată cu creșterea temperaturii, numărul ciocnirilor dintre atomi pe secundă se mărește și, în plus, crește și forța de șoc. Se poate întîmpla ca un atom oarecare, foarte rapid, să se ciocnească de un electron liber care i se nimerește în cale, și anume în așa fel, încît direcția șocului să coincidă cu direcția de mișcare a electronului spre suprafața cea mai apropiată a corpului. Firește, căpătînd o viteză mai mare, prin urmare și o energie cinetică mai mare, electronul va putea în acest caz să învingă forțele de interacțiune care apar la suprafața corpului și să scape în exterior. Pe măsură ce temperatura se mărește, crește numărul de electroni care evadează în afară. Acest fenomen, numit „emisiune termoelec-

tronică", este folosit pe scară largă în diferite ramuri ale științei și tehnicii.

Neavînd posibilitatea de a scăpa în exterior atunci cînd corpul se află la temperaturi joase, electronii pot totuși să treacă dintr-un corp în altul, atunci cînd între acestea există un contact sigur. Este ușor de înțeles că în acest caz se modifică radical împrejurările care duc la formarea forțelor superficiale, deoarece condițiile în care se găsesc electronii marginali se aseamănă cu condițiile în care se găsesc electronii în interiorul substanței: asupra acestor electroni acționează forțe atît din partea unui corp, cît și din partea celuilalt.

Dar care sînt cauzele ce obligă electronii să treacă dintr-un corp în celălalt? Această trecere are loc atunci cînd vin în contact unul cu altul, corpuri alcătuite din substanțe care posedă lucruri de ieșire de valori diferite. În acest caz, electronii vor începe să treacă din substanța cu lucrul de ieșire mai mic, în substanța la care lucrul de ieșire este mai mare. Se înțelege de la sine că această trecere nu poate continua la infinit. De ce oare? Fiindcă pe măsură ce electronii trec dintr-un corp în celălalt, numărul lor devine mai mic în primul corp și se mărește în cel de-al doilea. Aceasta duce la încărcarea pozitivă a primului corp, în timp ce al doilea se încarcă negativ. De o parte și de alta a limitei de separație a corpurilor apare o așa-numită sarcină electrică spațială, de semne diferite. Simultan cu apariția sarcinii, se ivește însă și un cîmp electric de contact, care crește odată cu acumularea sarcinilor și este îndreptat de la substanța cu lucru de ieșire mai mic spre substanța al cărei lucru de ieșire este mai mare. Intensitatea acestui cîmp, crescînd mereu, provoacă un flux electronic crescător dirijat în sens invers. În fine, pentru o valoare oarecare a intensității cîmpului electric, fluxurile de electroni care trec într-un sens și în celălalt se egalizează, se ajunge la un echilibru dinamic și între un corp și celălalt se stabilește o diferență de potențial de contact strict determinată.

Diferența de potențial de contact creează condițiile necesare pentru formarea stratului de blocare, care apare la limita dintre un semiconductor cu goluri și unul electronic.

Să punem în atingere două semiconductoare de acest fel, despre care știm dinainte că lucrul de ieșire al electronilor din semiconductorul cu goluri este mai mare decît lucrul de ieșire corespunzător semiconductorului electronic. În ase-

menea condiții, câmpul electric de contact care se formează, acționând asupra electronilor de conducție din semiconductorul electronic, îi va îndepărta până la o oarecare distanță de limita de separație. Pe de altă parte, același câmp electric de contact, acționând asupra golurilor din substanța cu goluri, le împinge pe acestea în adâncul semiconductorului cu goluri, îndepărtându-le de limita de separație. Ca rezultat, în sistemul considerat va apărea un strat cu grosimea d , sărăcit în ce privește purtătorii de electricitate. Limita de separație a celor doi semiconductori se află chiar în interiorul acestui strat. Prin urmare, stratul sărac în purtători cuprinde o parte din semiconductorul cu goluri și o parte din cel electronic. Rezistivitatea unui asemenea strat, în comparație cu rezistivitatea semiconductoarelor aderente la el de o parte și de alta, este considerabil mai mare și ajunge la asemenea proporții, încât — în ciuda grosimii neînsemnate, de circa 10^{-5} cm — rezistența lui totală este mult mai mare decât suma rezistențelor semiconductorului electronic și celui cu goluri, care alcătuiesc sistemul redresor. Acest strat este tocmai stratul de blocare despre care s-a pomenit mai sus (fig. 9). Să vedem acum în ce mod se va comporta stratul de blocare într-un câmp electric alternativ exterior. În acest scop vom aplica sistemului nostru o diferență de potențial alternativă. În acest caz, când câmpul electric exterior este dirijat de la semiconductorul electronic spre cel cu goluri, el va mări câmpul de contact existent anterior și, din această cauză, electronii din semiconductorul electronic și golurile din semiconductorul cu goluri se vor îndepărta încă și mai mult de limita de separație, ceea ce va duce la creșterea lățimii stratului de blocare. Dacă mai înainte, în absența câmpului electric exterior, lățimea stratului de blocare era d , acum ea capătă o nouă valoare, $d_1 > d$. Datorită acestui fapt se mărește și rezistența stratului de blocare.

Cu totul altceva se va observa atunci când semnul diferenței de potențial aplicate va fi inversat. În acest caz, câmpul electric exterior — fiind dirijat de la semiconductorul cu goluri spre cel electronic — poate nu numai să atenueze câmpul de contact, dar să-l și echilibreze, datorită cărui fapt lățimea stratului de blocare va deveni considerabil mai mică decât anterior, sau chiar se va anula. Noua valoare d_2 a lățimii stratului de blocare, mai mică decât d , va duce la o micșorare considerabilă a rezistenței acestuia.

Prin urmare, stratul de blocare al unui sistem redresor, găsiindu-se într-un câmp alternativ exterior, parcă pulsează. Pulația constă în faptul că grosimea lui când se mărește, când se micșorează, ceea ce duce la o variație corespunzătoare a rezistenței totale a stratului, care devine și ea când foarte mare, când foarte mică. Acest mecanism de funcționare a stratului de baraj creează toate condițiile care asigură conductibilitatea unidirecțională a sistemului redresor. În acest sistem, sensul de trecere (sensul direct) va fi sensul în care câmpul electric exterior, dirijat de la semiconductorul cu goluri spre cel electronic, obligă electronii și golurile să se miște unii în întâmpinarea celorlalți spre limita de separație a celor două semiconductoare. Sensul de blocare a

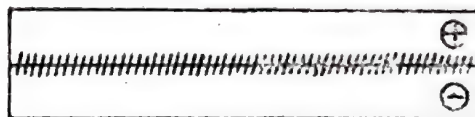


Fig. 9. Stratul de blocare (regiunea hașurată) cuprinde o parte din semiconductorul cu goluri și o parte din semiconductorul electronic

curentului corespunde cazului când câmpul electric exterior obligă electronii și golurile să se miște în sensuri opuse.

Introducând sistemul redresor într-un circuit de tensiune alternativă, se pot redresa curenții alternativi. În acest caz, în timpul unei semiperioade, curentul va circula prin redresor, iar în decursul celei de-a doua semiperioade va fi atât de slab, încât practic poate să nu fie luat în considerare. Raportul dintre intensitatea I_r în sensul de trecere și intensitatea I_{bl} a curentului în sensul de blocare, pentru una și aceeași diferență de potențial, se numește factor de redresare. Cu cât valoarea numerică a factorului de redresare este mai mare și, de asemenea, cu cât intensitatea curenților care circulă în sensul de trecere este mai mare, cu atât redresorul își va îndeplini funcțiunea mai bine.

8. EFECTUL FOTOELECTRIC INTERIOR

În 1873 a fost descoperit un fenomen extrem de interesant, a cărui semnificație poate fi înțeleasă din următoarea experiență. Să alcătuim un circuit electric simplu dintr-o sursă de curent, un galvanometru și niște conductoare și plăcuțe de legătură. De la polul pozitiv al bateriei vom duce un conductor la o plăcuță prinsă, așa cum se arată în fig. 10, între doi electrozi și confecționată nu dintr-un material obișnuit, ci

din seleniu chimic pur. Apoi, la cel de-al doilea electrod al plăcuței de seleniu vom conecta un conductor care duce la o bornă a galvanometrului, iar de la a doua bornă a galvanometrului vom lega un conductor la polul negativ al bateriei.

După ce vom sfârși alcătuirea acestui circuit extrem de simplu, putem proceda la efectuarea experienței. Să acoperim plăcuța de seleniu cu un material opac oarecare, de exemplu cu o mușama groasă, pentru ca pe ea să nu cadă raze de lumină. Deoarece circuitul electric din experiența noastră este

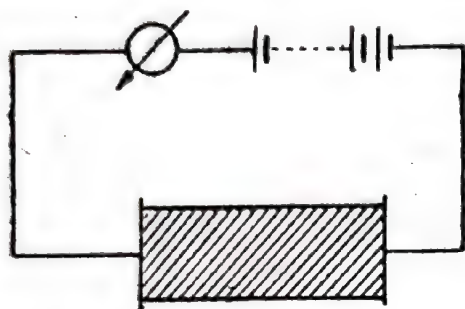


Fig. 10. Plăcuță de seleniu conectată în circuitul unei surse de curent

închis, prin el va trece un curent electric și acul galvanometrului va devia din poziția lui medie.

Ce factori determină intensitatea curentului în circuitul nostru?

Indicațiile galvanometrului sînt condiționate de doi factori: forța electromotoare a bateriei și valoarea rezistenței întregului circuit.

Evident, rezistența conductoarelor de conexiune din cupru este

atît de mică, încît ea poate fi neglijată. În ce privește rezistența plăcuței de seleniu, ea este relativ mare, fiindcă seleniul face parte din clasa semiconductoarelor.

Să observăm indicațiile galvanometrului atunci cînd plăcuța se găsește în obscuritate, iar apoi să luăm de pe ea învelișul de mușama opacă, pe care l-am folosit pentru ca lumina să nu ajungă la seleniu și să îndreptăm spre plăcuță un flux de lumină intens. Vom observa în acest caz că acul galvanometrului va devia imediat și se va găsi în această poziție atît timp cît seleniul este supus iluminării. La întunecarea ulterioară a seleniului, acul va reveni în poziția lui inițială. Apare o întrebare firească: de ce intensitatea curentului din circuitul nostru depinde de faptul dacă seleniul este iluminat sau nu?

Este cît se poate de clar că creșterea intensității curentului în cazul iluminării plăcuței de seleniu are loc fiindcă sub acțiunea luminii se micșorează rezistența seleniului.

Explicația este suficient de elementară, dar în egală măsură nici nu spune nimic despre mecanismul intern al unui fenomen atît de neobișnuit. De ce se micșorează rezistența seleniului sub acțiunea luminii? Care sînt forțele ce modi-

fică radical proprietățile fizice ale substanței? De ce nu se observă procese analoge în plăcuțele metalice?

La toate aceste întrebări, știința secolului al XIX-lea nu a putut da un răspuns.

Fizicienii s-au interesat imediat de această descoperire senzațională și au început să studieze amănunțit cele mai variate substanțe, încercând să găsească și la ele fenomene asemănătoare. Cercetările lor au fost încununate de succes. S-a descoperit că micșorarea rezistenței electrice în timpul iluminării se observă la foarte multe cristale naturale și la semiconductoare produse pe cale artificială. Deosebit de puternic se manifestă acest efect la unii compuși de metale cu sulf sau oxigen. Dintre aceste combinații chimice fac parte: sulfura de taliu, sulfura de plumb, sulfura de argint, oxidul de cupru, sulfura de cadmiu, molibdenitul, stibnitul și multe altele.

Studiul amănunțit al acestui fenomen a arătat că micșorarea rezistenței unui semiconductor fotosensibil își urmează legile ei. S-a dovedit astfel că variația rezistenței unor diverse substanțe apare sub acțiunea luminii de compoziție spectrală diferită: la unele substanțe ea se observă atunci când iradierea se face cu raze ultraviolete și raze vizibile, și nu are loc nici un fel de schimbare a conductibilității electrice sub acțiunea radiațiilor infraroșii. La alte substanțe, dimpotrivă, efectul se manifestă cu intensitate maximă tocmai atunci când substanța este „iluminată” cu raze infraroșii.

Prin analogie cu efectul fotoelectric exterior, în cazul căruia lumina — acționând asupra suprafeței unui metal — eliberează electroni din acesta, micșorarea rezistenței electrice — observată în interiorul substanței și provocată de iradierea cu lumină — a fost denumită efect fotoelectric interior, iar apariția unei conductibilități electrice suplimentare, provocată de lumina absorbită, a căpătat denumirea de fotoconductibilitate.

Au trecut câțiva ani după descoperirea efectului fotoelectric interior. Fizicienii și-au continuat încercările asidue de a dezlega misterul acestui fenomen, neclar la prima privire. S-au organizat experiențe, s-au elaborat teorii, dar fenomenul continua să rămână de neînțeles. Dar pe măsură ce materialul experimental se acumula din ce în ce mai mult, iar dezvoltarea generală a fizicii semiconductoarelor progresa, a apărut speranța de a înțelege mecanismul fenomenului studiat, care pînă la urmă a fost descifrat.

Dar în ce constă esența fizică a efectului fotoelectric interior? În timp ce la metale conducția este observată la toate temperaturile posibile, în semiconductoare conducția apare — în condiții obișnuite — numai datorită mișcării termice. Cu toate acestea, se pot crea condiții care să asigure apariția conducției într-un semiconductor, indiferent de temperatura acestuia. Deoarece într-un semiconductor electronic conducția apare numai datorită faptului că electronii ajung în zona liberă, este suficient să se comunice electronilor energia necesară pentru trecerea lor în această zonă, pentru a se putea descoperi apariția conducției. Electronii obțin energia necesară în acest scop de la alte particule care participă la mișcarea termică. Aceeași energie poate fi însă purtată și transmisă electronului nu numai de particulele substanței însăși, dar și de altceva, în particular de o radiație. În ultimul caz, într-un semiconductor sau într-un dielectric poate apărea fotoconductibilitatea.

Pentru simplitate, să considerăm un semiconductor cu conducție electronică.

La o temperatură oarecare T , într-un semiconductor aflat în întuneric, un număr oarecare n de electroni se găsesc în zona liberă. Datorită acestor electroni există conductibilitatea electrică obișnuită a semiconductorului, care mai este numită altfel și conductibilitate „de obscuritate”. Dacă semiconductorul este iradiat cu fotoni de energie corespunzătoare, în zona liberă — în afară de electronii „de obscuritate” care existau acolo anterior — va apărea un nou număr n_1 de electroni „de iluminare”, și numărul total de electroni din zonă va deveni acum $n + n_1$. Ca urmare, conductibilitatea electrică se va mări și va căpăta valoarea

$$\sigma = ne\mu + n_1e\mu_1,$$

unde primul termen reprezintă conductibilitatea de obscuritate, iar cel de-al doilea — fotoconductibilitatea.

Din cele mai generale concepții referitoare la natura proprietăților electrice ale semiconductoarelor rezultă cât se poate de clar cauza apariției fotoelectronilor în zona liberă. Fără îndoială, furnizorul atât de electroni de obscuritate, cât și de electroni de iluminare este zona ocupată. Se înțelege că atât unii electroni, cât și ceilalți, au ajuns în zona liberă numai datorită faptului că au dobândit energia necesară lor pentru traversarea zonei interzise de „lățime” ΔE_1 . În consecință, fotoconductibilitatea a apărut datorită faptului că fotonii care

cad pe suprafața conductorului și sînt absorbiți de ea au cedat întreaga lor energie fotoelectronilor. Fiecare foton posedă energia $h\nu$. Dacă această energie depășește ca valoare energiei ΔE_1 , sau este cel puțin egală cu ea, electronul care se găsește în zona ocupată va putea trece în zona de conducție. De aici rezultă o consecință inevitabilă: fotoconductibilitatea este posibilă atunci cînd $h\nu \geq \Delta E_1$. Radiația poate fi însă de diferite frecvențe, în particular și de aceea careia îi corespunde situația $h\nu < \Delta E_1$. În acest caz, fotoconductibilitatea nu apare. Prin urmare, pentru fiecare substanță fotosensibilă există un prag de fotoconductibilitate, care corespunde condiției.

$$h\nu_0 = \Delta E_1.$$

Dacă frecvența ν a radiației incidente pe semiconductor este mai mică decît ν_0 , fotoconductibilitatea nu se va ivi. Numai radiația cu frecvența $\nu \geq \nu_0$ este capabilă de a produce fotoconductibilitate.

Pragul roșu al efectului fotoelectric, adică valoarea lui ν_0 , depinde de însuși semiconductorul în care se observă efectul fotoelectric, și anume de faptul dacă el conține sau nu adaosuri. În cel de-al doilea caz, o importanță esențială are caracterul adaosurilor.

Fotoconductibilitatea sau efectul fotoelectric interior, nu apare nici pe departe la toate semiconductoarele, dar — indiferent de aceasta — o condiție obligatorie a apariției fotoconductibilității trebuie să fie absorbirea de către substanță a radiației incidente. Numai în acest caz poate apărea, în principiu, efectul fotoelectric.

Experiențele fizicienilor sovietici au stabilit clar că, în ce privește comportarea lor, fotoelectronii nu se deosebesc prin nimic de electronii termici, pînă la coincidența practică totală a mobilităților lor.

Electronii eliberați de lumină se găsesc, pentru o perioadă de timp foarte scurtă, în zona liberă. În această perioadă ei rătăcesc prin spațiile interatomice și, dacă există o diferență de potențial între două puncte ale semiconductorului, se deplasează de preferință într-o singură direcție, dînd naștere în felul acesta unui curent electric. După aceea, fotoelectronii „cad” din nou, adică trec iarăși la nivelurile mai joase ale adaosurilor sau chiar în zona ocupată. În cazul unei iluminări neîntrerupte a unui semiconductor apar însă noi și noi fotoelectroni și după același timp o parte oarecare din ei revin

înapoi. Ca rezultat, se stabilește un echilibru dinamic, cînd numărul de fotoelectroni care apar devine egal cu numărul de electroni care se reîntorc înapoi.

Fotoelectronii se găsesc în stare liberă pentru un interval de timp extraordinar de scurt. Dar în acest interval de timp scurt „al duratei de viață“ (de la 10^{-3} pînă la 10^{-7} s) electronii care se găsesc în zona liberă sînt echivalenți cu electronii de conducție.

Dezvăluirea naturii efectului fotoelectric interior ne permite să înțelegem că substanțele semiconductoare își măresc considerabil conductibilitatea electrică nu numai sub acțiunea unei radiații. În principiu, orice particulă care ajunge într-un atom și cedează unui electron întreaga ei energie este capabilă să îl aducă în starea liberă. Experiințe nenumărate, repetate de multe ori, au arătat că conductibilitatea apare și în cazul cînd suprafața substanței este bombardată cu electroni rapizi, particule α , protoni, deutroni și alte particule. Firește, pentru apariția conductibilității este necesar să fie respectată condiția: energia particulei care bombardează trebuie să fie mai mare decît energia necesară trecerii electronului în starea liberă.

În semiconductoare, concentrația electronilor de conducție — la temperatura camerei — este considerabil mai mică decît la metale, iar numărul de electroni care apar sub acțiunea luminii este relativ mare, în orice caz el este astfel, încît — pentru o iluminare corespunzătoare — în unele substanțe, cum este de exemplu sulfura de cadmiu (CdS), care poate depăși cu patru ordine de mărime numărul de electroni de conducție în obscuritate. La alte substanțe însă, mai puțin fotosensibile, numărul de fotoelectroni poate atinge 20—30% din numărul total de electroni de conducție chiar în cazul unei iradiații nu prea intense. Firește, această proprietate a unor semiconductoare îi face, chiar numai în această unică privință, materiale foarte importante și extrem de necesare.

9. EFECTUL FOTOVOLTAIC

În 1876, savanții americani Adams și Day au descoperit că la iluminarea unei baghete de seleniu, între capetele ei libere apare o forță electromotoare de valoare mică. Mult timp acest fenomen nu a atras atenția cercetătorilor și chiar a fost uitat. Numai în anul 1924, cu ocazia studiului proprietăților redresoare ale oxidului de cupru, el a fost descoperit



din nou. Pentru a avea o imagine clară despre procesele ce se desfășoară în acest caz, vom face următoarea experiență. Luăm o plăcuță de cupru, care are depus pe una din suprafețe un strat de oxid de cupru. Oxidul de cupru îl vom acoperi cu un strat foarte subțire de metal, de exemplu cu argint, în așa fel încît stratul de argint să adere cît se poate de bine la oxidul de cupru. Această acoperire se efectuează cu o instalație specială, în care se topește argint sau oricare alt metal. Vaporii de metal se depun pe suprafața oxidului de cupru, acoperind-o cu un strat de grosimea necesară. Grosimea stratului trebuie să permită trecerea luminii. Se știe că straturile metalice foarte subțiri sînt semitransparente: printr-o peliculă metalică subțire se pot observa destul de bine obiectele.

După aceea, se alcătuiește un circuit electric simplu. La electrodul de argint semitransparent conectăm colectorul de la o bornă a unui galvanometru, iar cea de a doua bornă a acestuia din urmă o legăm la cupru (fig. 11). Acest circuit se caracterizează prin faptul că el nu conține o sursă de curent — o baterie sau un acumulator. Este natural să presupunem că în acest caz acul galvanometrului se va afla mereu în dreptul diviziunii zero. O asemenea ipoteză, dacă am face-o, ar fi însă pripită și eronată. Este ușor să ne convingem de acest fapt. Să îndreptăm spre electrodul superior de argint semitransparent un flux de lumină. O parte oarecare din lumină va fi reflectată de stratul de argint, altă parte va fi absorbită în interiorul acestui strat și, în fine, partea care rămîne, trecînd prin argint, va fi absorbită de oxidul de cupru. Privind galvanometrul, vom constata că acul lui s-a deplasat mult spre dreapta față de poziția lui de zero inițială, adică în circuit a apărut un curent. Este cît se poate de evident că în experiența noastră apariția curentului electric este provocată de acea parte din fluxul luminos, care a fost absorbită în stratul de oxid de cupru. Fără a ne ocupa deocamdată de natura acestui fenomen, putem spune imediat că aici are loc o transformare directă a energiei radiante în energia electrică.

Un fenomen analog se observă nu numai la oxidul de cupru, dar și la o serie întreagă de alte semiconductoare, prelucrate în mod corespunzător.

Studiul consecvent al acestui fenomen a arătat că el apare mai ales la iluminarea unui sistem format dintr-un semiconductor electronic și unul cu goluri, care vin în contact și între care există un strat de blocare; despre acesta

din urmă s-a vorbit amănunțit în § 6. Stratul de blocare joacă aici unul dintre rolurile principale, asigurând transformarea directă a energiei radiante în energia electrică.

Fenomenul apariției forței electromotoare sau a unui curent electric sub acțiunea luminii, în sisteme compuse dintr-un semiconductor electronic și unul cu goluri, un strat de blocare și electrozi metalici, a căpătat denumirea de efect fotoelectric al stratului de blocare sau efect fotovoltaic.

Dacă se respectă anumite condiții, despre care se va vorbi în amănunt în partea a doua a cărții, în limita de separație

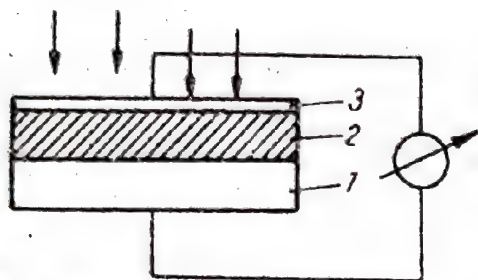


Fig. 11. Plăcuță de cupru cu oxid cupros, conectată în circuitul unui galvanometru:

1 — plăcuță de cupru, 2 — strat de Cu_2O ,
3 — electrod metalic semitransparent

dintre semiconductorul cu goluri și cel electronic apare o așa-numită joncțiune $p-n$, adică o regiune în care se localizează stratul de blocare. În această regiune se și desfășoară procesele fizice principale, răspunzătoare de apariția efectului fotovoltaic. Mecanismul acestor procese se compune din mai multe etape. Să le examinăm mai cu atenție.

Să punem în contact două plăcuțe, una dintr-un semiconductor electronic, iar cealaltă dintr-un semiconductor cu goluri. De ambele părți ale limitei lor de separație se va localiza stratul de blocare. Să ne imaginăm că pe suprafața uneia dintre plăcuțe cade un flux de lumină, care este absorbită parțial de plăcuță. Lumina absorbită eliberează simultan, în semiconductor, electroni și goluri, formând așa-numitele perechi „electron-gol”. Eliberarea perechilor se reduce la faptul că electronii din zona ocupată sînt expulzați în zona liberă, devenind în felul acesta electroni de conducție, iar golurile rămîn în zona ocupată și capătă de asemenea posibilitatea de a participa la conductibilitatea electrică.

Dacă lumina ar fi absorbită de un singur semiconductor oarecare, care nu este în contact cu alt semiconductor, perechile care apar sub influența luminii ar mări numai conductibilitatea semiconductorului respectiv și cu aceasta toate s-ar sfîrși. Cu totul altceva se întîmplă în sistemul considerat de noi, format din semiconductoare cu conductibilitate electronică (notați cu litera n) și semiconductoare cu conductibilitate prin goluri (notați cu litera p). Contactul între semiconductoare n și p duce la formarea între ele a unui cîmp electric de con-



tact. Dacă lucrul de ieșire al semiconductorului cu goluri este mai mare decât lucrul de ieșire al celui electronic, ceea ce este obligatoriu pentru două semiconductoare de aceeași compoziție chimică, acest câmp electric de contact este dirijat de la semiconductorul electronic spre cel cu goluri. Ce se întâmplă în acest caz cu perechile? Evident, purtătorii de curent neprincipali (în minoritate) „eliberați” de lumină, adică electronii din semiconductorul cu goluri sau golurile din semiconductorul electronic, se deplasează liber în toate direcțiile. La apropierea de joncțiune $p-n$, sub acțiunea câmpului de contact, ei vor trece însă prin stratul de blocare, dintr-un semiconductor în celălalt. Pe măsură ce purtătorii de curent în minoritate trec dintr-un semiconductor în altul, acumularea lor într-o parte a sistemului considerat se va accentua, în timp ce în cealaltă parte va avea loc acumularea purtătorilor de curent în majoritate. Prin urmare, perechile formate sub acțiunea luminii vor începe să se separe; electronii se vor concentra în semiconductorul electronic, iar golurile — în semiconductorul cu goluri. Această acumulare nu poate continua la infinit, deoarece în paralel cu creșterea concentrației golurilor în semiconductorul cu goluri și a electronilor în cel electronic, crește câmpul electric creat de ele, care împiedică trecerea purtătorilor în minoritate dintr-un semiconductor, prin stratul de blocare, în celălalt semiconductor. Totuși, pe măsură ce intensitatea acestui câmp crește, se mărește și fluxul invers de fotopurtători în minoritate. Până la urmă se stabilește un echilibru dinamic, când numărul de purtători în minoritate, care se deplasează în unitatea de timp prin stratul de blocare devine egal cu numărul de purtători identici, care se deplasează în același interval de timp în sens invers. În acest caz, între electrodul superior și cel inferior se va stabili o diferență de potențial finală oarecare, aceasta reprezentând — în esență — tocmai forța fotoelectromotoare.

Dacă electrozii sînt conectați între ei prin conductoare, formîndu-se un circuit închis, prin acesta va trece curent electric în tot timpul cît sistemul de semiconductoare este supus acțiunii luminii.

10. TERMOELECTRICITATEA

În 1821 a fost descoperit un fenomen fizic foarte interesant, ale cărui posibilități tehnice au fost apreciate la justa lor valoare numai în timpurile noastre. Esența acestui feno-

men poate fi înțeleasă ușor din următoarea experiență. Să alcătuim un circuit electric închis, format din trei conductoare metalice și un aparat electric de măsurat. Drept conductor metallic vom lua două bucăți de sîrmă de cupru și o bucată de sîrmă de fier. Să legăm în serie aceste bucăți de sîrmă și aparatul de măsurat, așa cum se arată în fig. 12. Se înțelege ușor că într-un asemenea circuit unde nu există nici un fel de sursă de curent, acul aparatului de măsurat va sta la zero. Dacă vom începe apoi să încălzim punctul de contact dintre cupru și fier, iar celălalt punct de contact îl vom menține la o temperatură mai joasă, acul aparatului va devia din poziția lui de zero: prin circuit va trece un curent, care va circula atîta timp cît între contacte va exista o diferență de temperatură. Acest fenomen, denumit în știință efect termoelectric, se observă nu numai în cazul unor conductoare de cupru și fier, ci pentru orice combinații de metale și de alte substanțe conductoare de electricitate. Aici este important numai faptul că conductoarele sînt diferite și că între lipiturile unui conducător cu celălalt s-a menținut o diferență de temperatură.

În cazul considerat de noi circuitul electric a fost închis, dar el poate fi și deschis. Printr-un circuit deschis curentul nu va circula, dar între punctele extreme ale circuitului — dacă între lipituri există o diferență de temperatură — va apărea o oarecare diferență de potențial, numită forță electromotoare.

Fizicienii care au studiat fenomenele termoelectrice au stabilit că cu cît diferența de temperatură dintre lipituri este mai mare, cu atît valoarea E a forței termoelectromotoare este mai mare și, în consecință, cu atît este mai mare și intensitatea curentului termoelectric. Dacă temperatura unei lipituri este T_1 , iar a celeilalte T_2 , mărimea E va fi proporțională cu diferența acestor temperaturi: $E = \alpha (T_2 - T_1)$, unde α este așa-numitul coeficient de forță termoelectromotoare, egal numeric cu acea forță electromotoare care ar apărea în sistemul de conductoare considerat, dacă între lipituri ar exista o diferență de temperaturi de un grad. Valoarea forței electromotoare însăși, la rîndul ei, depinde în mare măsură de natura conductoarelor din care este alcătuit circuitul termoelectric. Astfel, de exemplu, un circuit constituit din sîrme de platină și bismut generează, pentru aceeași diferență de temperatură, o forță termoelectromotoare mult mai mare decît un circuit format, să zicem, din sîrme de aluminiu și cupru. În conse-

cință, pentru obținerea unor forțe electromotoare cît mai mari posibil este necesar să se aleagă un „cuplu” corespunzător, adică o combinație din două metale diferite. Cuplurile metalice au fost încă de mult studiate și se știe care dintre ele dau rezultate mai bune și care dau rezultate mai slabe. Dacă se conectează în serie mai multe asemenea cupluri, de exemplu 10, și toate lipiturile „fierbinți” sînt menținute la o temperatură mai înaltă, iar toate lipiturile „reci” la o temperatură mai scăzută, forța termoelectromotoare totală a unei asemenea termobaterii va fi de 10 ori mai mare decît aceea a unui singur cuplu.

La studiul fenomenului descris, oricît de superficial ar fi el, este evident faptul că aici are loc o transformare directă a energiei termice în energie electrică, fără nici un fel de stadii intermediare. În adevăr, încălzim lipiturile, adică le aplicăm energia termică și ca rezultat obținem curent electric. Ne putem imagina ușor ce perspective atrăgătoare oferă acest fenomen fizic extrem de interesant. Energia electrică produsă pe cale industrială necesită operații complicate, folosirea unor mașini scumpe care pretind o supraveghere continuă, repararea periodică și înlocuirea pieselor uzate. Scopul acestor mașini este de a transforma energia mecanică în energie electrică. La rîndul ei, această energie mecanică apare în multe cazuri pe seama absorbirii de energie termică. Știința și gîndirea tehnică ar obține o mare victorie dacă s-ar rezolva problema transformării directe a energiei termice în energie electrică, fără a fi nevoie de participarea unor mașini care posedă un număr mare de piese, de părți mobile și sînt de construcție complicată. Dacă am putea genera energie electrică fără intermediul unor mașini complicate, numai simpla aplicare a căldurii la lipituri termoelectrice, aceasta ar însemna o adevărată cotitură în știință. Pînă în prezent, această cotitură nu a avut încă loc și energia electrică se obține — ca și pînă acuma — tot prin procedeele vechi. Această se datorește faptului că în termocuplurile metalice numai o parte neînsemnată din energia termică aplicată lipiturii este transformată în energie electrică și, din această cauză, randamentul unui asemenea dispozitiv este extrem de mic, sub 1%. Situația a început să se schimbe numai după ce academicianul A. F. Ioffe a început să studieze semiconductoarele, care sînt remarcabile prin faptul că forța termoelectromotoare ce apare la multe dintre ele este de cîteva ori mai mare decît aceea obținută cu metale în aceleași condiții.

Să încercăm să elucidăm natura apariției forțelor electromotoare. Pentru a simplifica lucrurile, vom considera numai o singură sîrmă, confecționată dintr-o substanță semiconductoră oarecare, cu conducție electronică. Un capăt al sîrmei îl vom încălzi, iar celălalt îl vom răci. În aceste împrejurări, electronii de conducție vor începe să se deplaseze de la capătul mai cald al sîrmei, unde atît concentrația lor cît și energiile lor cinetice au valori mai mari, spre regiunea cu temperatură scăzută, unde concentrația și energiile lor cinetice sînt mai reduse. Pe de altă parte, are loc o deplasare a electronilor și în sens contrar, de la capătul rece spre cel cald. Pînă la un anumit moment, numărul de electroni care se mișcă de la capătul cald spre cel rece este mai mare decît cel în sens invers. Această deplasare a electronilor face ca la capătul cald al sîrmei să apară un surplus de sarcini pozitive, iar la cel rece — un surplus de sarcini negative. Apariția unor sarcini pozitive și negative la capetele opuse ale sîrmei, este însoțită de stabilirea în interiorul semiconductorilor, a unui cîmp electric, dirijat de la capătul cald spre cel rece. Chiar de la începutul procesului studiat, electronii se deplasează în număr mai mare de la capătul cald spre cel rece, decît în sens invers și prin aceasta măresc acumularea de sarcini spațiale pozitive și negative în regiunile opuse ale sîrmei. Acest fapt important face ca intensitatea cîmpului electric, la rîndul ei, să crească și ea simultan cu mărirea cantității de electricitate pozitivă și negativă la capetele sîrmei. De aceea, cu toate că diferența de temperatură este menținută neînterupt, acumularea sarcinilor la capătul cald și cel rece ale sîrmei va înceta pînă la urmă. Aceasta se întîmplă deoarece intensitatea cîmpului electric crește atît de mult, încît nu mai este posibilă deplasarea preferențială a electronilor de la capătul cald spre cel rece. Intervine aici echilibrul termic, cînd fluxurile de electroni dintr-un sens și din celălalt se egalizează. Ca rezultat al tuturor acestor procese, între punctele extreme ale sîrmei — pentru o diferență de temperatură dată — se stabilește o diferență de potențial constantă care va constitui tocmai forța termoelectromotoare a semiconductorului respectiv.

În exemplul studiat de noi a figurat o sîrmă făcută din semiconductor cu o conducție electronică. Ce se va întîmpla însă într-o sîrmă confecționată dintr-un semiconductor cu goluri? Lucrurile vor fi absolut identice, numai cu deosebirea că în acest caz nu se vor deplasa electronii ci golurile. De

aceea, capătul cald al unui semiconductor cu goluri se va încărca întotdeauna negativ, iar cel rece, pozitiv. Într-un semiconductor electronic, după cum am văzut, s-a observat o situație inversă: capătul cald se încarcă pozitiv, iar cel rece negativ.

Dacă se alcătuieste un circuit din două semiconductoare, unul electronic iar celălalt cu goluri, și se închide acest cir-

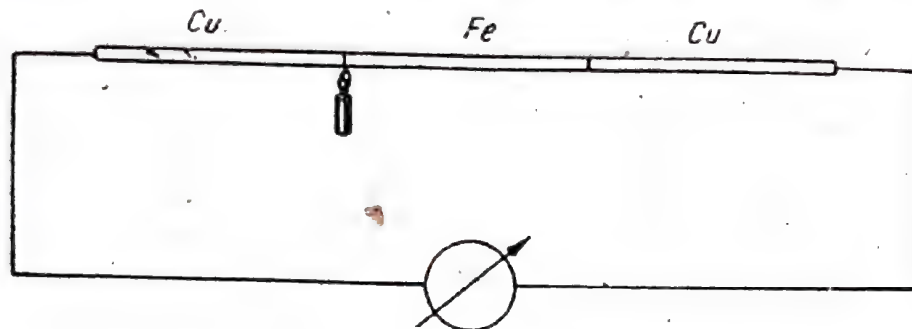


Fig. 12. Circuit termoelectric

cuit printr-un receptor oarecare de energie electrică, iar după aceea se creează între lipituri o diferență de temperatură, în circuit apare un curent termoelectric.

În acest caz, după cum se poate ușor înțelege, curenții termoelectrici care se ivesc separat în fiecare ramură se adună, formînd curentul „cuplului”.

Se poate răspunde acum la întrebarea: care sînt avantajele principale ale semiconductoarelor în comparație cu metalele? Mecanismul apariției forței electromotoare la metale este identic cu acela din cazul semiconductoarelor. La metale, într-un interval larg de temperaturi, concentrația electronilor liberi rămîne însă practic constantă și, ceea ce este mai important, energia lor cinetică depinde în mică măsură de temperatură. De aceea, creînd la capetele metalului o diferență de temperatură, deși obținem condițiile pentru deplasarea preferențială a electronilor de la capătul cald spre cel rece, această deplasare este atît de neînsemnată, încît diferența de potențial rezultantă este extrem de mică.

În semiconductoare însă, energia cinetică a electronilor sau a golurilor, precum și concentrația lor, depind considerabil de temperatură, ceea ce duce la valori mari ale forțelor termoelectromotoare.

Se poate arăta că randamentul transformării energiei termice în energie electrică, cu ajutorul termocuplurilor, este cu atît mai mare, cu cît valoarea conductivității δ și a coeficien-

tului α este mai mare și cu atât mai mic, cu cât coeficientul de conductibilitate termică κ este mai mare. Combinarea acestor trei mărimi în semiconductoare are o valoare mai mare decât la metale. Conductivitatea electrică a metalelor este considerabil mai mare decât conductivitatea semiconductoarelor, dar în schimb la semiconductoare valoarea lui α depășește de zeci și chiar sute de ori valoarea lui α pentru metale. În plus, conductibilitatea termică a semiconductoarelor este de câteva ori mai mică decât aceea a metalelor. Toate acestea luate împreună duc la valori relativ mari ale randamentului termocuplurilor confecționate din semiconductoare, care în prezent ajung până la aproape 8%. Proprietățile termoelectrice bune ale semiconductoarelor au permis să se progreseze mult în rezolvarea problemei importante a transformării energiei termice direct în energie electrică.

11. EFECTUL PELTIER

În 1834, naturalistul francez Jean Charles Anastase Peltier a descoperit un nou fenomen fizic. Sensul acestui fenomen poate fi înțeles ușor examinând un circuit electric alcătuit din trei conductoare ABA și o sursă de tensiune continuă (fig. 13). După cum se arată în fig. 13, conductoarele AA , confecționate din unul și același material, formează ramurile extreme ale circuitului, iar conductorul B , făcut din alt material, constituie porțiunea din mijloc a acestuia. Curentul electric continuu care trece prin circuit provoacă apariția în acesta a mai multor fenomene termice. Unul dintre ele este degajarea de căldură în conductoare, prin efect Joule-Lenz. Alt fenomen, descoperit de Peltier, constă în faptul că în locul de contact dintre conductorul A și conductorul B , pe lângă cantitatea de energie disipată prin efect Joule-Lenz, se degajează o cantitate oarecare de energie termică Q , iar în locul de contact al conductorului B cu conductorul A se absoarbe o cantitate de energie egală. Ca rezultat, în regiunile de contact ale conductoarelor se stabilesc temperaturile T_1 și T_2 , iar $T_1 > T_2$. Fizicianul E. H. Lenz din Petersburg, care s-a interesat de acest fenomen, a început să-l studieze amănunțit. Făcând să treacă un curent electric printr-un sistem format din conductoare metalice de natură diferită, el a reușit să micșoreze atât de mult temperatura unei lipituri, încât o picătură de apă care se găsea pe lipitură a înghețat.

Cercetările ulterioare au dus la descoperirea a numeroase relații cantitative importante. După cum s-a reușit să se stabilească, cantitatea de căldură Q degajată la o lipitură sau, invers, în cazul sensului opus al curentului — absorbită de lipitură, este proporțională cu intensitatea I a curentului și cu timpul t cât durează curgerea acestuia

$$Q = PIT,$$

unde P este coeficientul lui Peltier, numeric egal cu acea cantitate de energie termică ce se degajă sau este absorbită în lipitură atunci când prin aceasta trece o cantitate de electricitate egală cu unitatea. Analizînd efectul Peltier și folosind în acest scop relațiile termodinamice, fizicianul William Thomson a stabilit, în 1857, că între coeficientul α de forță termoelectromotoare și coeficientul P există următoarea relație:

$$P = \alpha T,$$

unde T este temperatura absolută.

Toate fenomenele termoelectrice, inclusiv efectul Peltier, se desfășoară deosebit de pregnant în sistemele alcătuite din semiconductoare electronice și cu goluri. În adevăr, între coeficientul P și coeficientul α de forță termoelectromotoare există o interdependență: aceste mărimi sînt proporționale una cu alta. De aceea, un circuit termoelectric eficace trebuie să fie format nu din ramuri metalice, ci semiconductoare și anume în așa fel, încît o ramură să fie confecționată dintr-un semiconductor cu conducție electronică pronunțată, iar celălalt, cu conducție prin goluri. Care este explicația fenomenului Peltier?

Vom încerca să răspundem la această întrebare considerînd la început un circuit termoelectric alcătuit din semiconductoare eterogene care posedă un singur tip oarecare de conducție, să zicem electronică. Factorul principal, care joacă un rol preponderent în procesul considerat, constă în faptul că în diferitele substanțe din care sînt confecționate ramurile circuitului termoelectric, purtătorii de electricitate (electroni sau goluri) posedă energie diferită. De aceea, cînd sensul curentului electric este astfel, încît electronii care posedă o

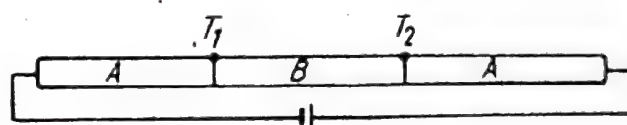


Fig. 13. Circuit care ilustrează efectul Peltier

energie mai mare trec în semiconductorul în care energia electronilor este mai mică, primii electroni — la trecerea, prin regiunea de contact, la celălalt conductor — își cedează energia suplimentară atomilor care formează acest semiconductor, ceea ce duce la o degajare de căldură în punctul de contact. Invers, când curentul circulă în așa fel, încît electronii care posedă energie mai mică trec prin punctul de contact în celălalt semiconductor, în care energia electronilor este mai mare, electronii ce s-au deplasat își măresc energia pe seama energiei atomilor acestui ultim semiconductor și în regiunea de contact are loc o absorbție de căldură.

Vorbind cu cuvintele academicianului A. P. Ioffe, „fluxul de electricitate care circulă prin termocupluri este însoțit de un flux de căldură de la un capăt la altul. În acest caz, capătul de la care se ia căldură se va răci, iar celălalt — spre care se îndreaptă căldura — se va încălzi“. În aceste raționamente au figurat semiconductoare cu conducție de tip electronic. Lucrurile se întîmplă exact la fel și atunci când circuitul este alcătuit din termocupluri semiconductoare cu mecanism de conducție prin goluri. Totuși, așa cum s-a arătat mai sus, fenomenele termoelectrice se desfășoară deosebit de eficace în circuitele formate din semiconductoare electronice și cu goluri. Să examinăm un circuit de acest fel. Vom admite că el este alcătuit dintr-o bară semiconductoare care posedă conducție prin goluri, o a doua bară semiconductoare, făcută din substanță cu conducție electronică, și dintr-o sursă de tensiune continuă, de exemplu o baterie de acumulare. Să presupunem, așa cum se arată în fig. 14, că sensul curentului este de la stînga spre dreapta. În acest caz, golurile din semiconductorul cu goluri și electronii din cel electronic se vor deplasa unii în întîmpinarea altora. La punctul de contact va avea loc recombinarea lor. Mecanismul acestei recombinații este următorul: un electron, care anterior „se găsea“ în zona liberă a semiconductorului electronic, ajungînd în semiconductorul cu goluri, „trece“ imediat în zona ocupată, în locul unui gol. În acest caz, întreaga lor energie anterioară se transformă în căldură, care se și degajează în regiunea de contact. Cu totul altfel stau lucrurile atunci când sensul curentului este astfel, încît golurile și electronii se vor deplasa în sensuri opuse (fig. 15). În acest caz, electronii care se găseau în zona ocupată a semiconductorului cu goluri, „sînt împinși“ în zona liberă a celui electronic. Ca urmare, electronul și golul care apar simultan se vor deplasa, sub acțiunea

cîmpului electric exterior, în sensuri opuse. Pentru formarea unei perechi „electron-gol” se absoarbe o cantitate oarecare de energie luată din rezervele de căldură ale contactului, ceea ce duce la scăderea temperaturii acestuia. Din studiul mecanismului efectului Peltier se poate deduce ușor o regulă mnemotehnică ce permite să se stabilească fără greșală la ce

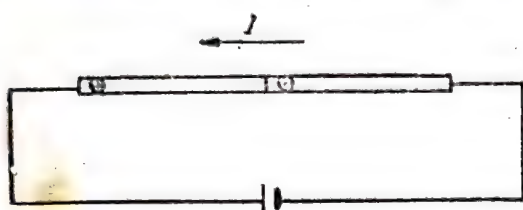


Fig. 14. În cazul unui asemenea sens al curentului, golurile și electronii se vor deplasa unii în întâmpinarea celorlalți spre locul de contact

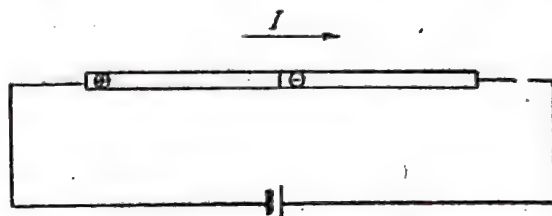


Fig. 15. În cazul acestui sens al curentului, golurile și electronii se vor mișca în sensuri opuse

punct de contact va avea loc o degajare sau, dimpotrivă, o absorbție de energie termică. Dacă curentul electric este dirijat de la semiconductorul cu goluri spre cel electronic, în punctul de contact se degajează energie termică. Când curentul este îndreptat de la semiconductorul electronic spre cel cu goluri, în regiunea de contact se absoarbe energie termică. La fel ca și termoelectricitatea, care mai înainte nu juca nici un rol în energetică, efectul Peltier a fost mult timp considerat mai curînd un fel de curiozitate, decît ca un fenomen important din natură, capabil de a aduce foloase practice. Apreciind posibilitățile termocuplurilor din semiconductoare, academicianul A. F. Ioffe a emis în 1949 ideea de a se folosi efectul Peltier pentru crearea unor instalații de răcire. Curînd a elaborat el însuși o teorie amănunțită a instalațiilor de răcire termoelectrice, care a fost inclusă în cartea de tematică mai largă „Bazele energetice ale bateriilor termoelectrice din semiconductoare”, care a văzut lumina tiparului în 1950. Din acest moment, fizicienii Institutului de semiconductoare al Academiei de științe a U.R.S.S. și-au concentrat eforturile spre rezolvarea problemei obținerii frigului pe cale termoelectrică. Ca rezultat al acestor eforturi au apărut primele modele de laborator de instalații de răcire, care au trecut cu succes prin încercările de exploatare. Acestea din urmă au arătat că, în comparație cu metodele existente, procedeul de răcire pe cale termoelectrică posedă o serie întreagă de avantaje neprețuite. Mai mult încă, s-a dovedit că în nume-

roase cazuri, numai cu ajutorul bateriilor de răcire cu semiconductoare se pot soluționa problemele care nu pot fi rezolvate ușor și simplu prin metodele precedente.

12. LUMINESCENȚA

Unele materiale semiconducătoare posedă proprietatea de a deveni luminescente, adică de a emite lumină, fără a fi încălzite pînă la temperaturile înalte la care apare — la substanțele obișnuite — lumina de temperatură. Spre deosebire de lumina de temperatură, orice emisiune de lumină, care nu necesită temperaturi înalte, se numește luminescență. Acest termen provine de la cuvîntul latin *lumen*, care înseamnă lumină.

În prezent, se cunoaște un număr destul de considerabil de substanțe semiconductoare capabile de a deveni luminescente, iar fizicienii reușesc astăzi să le producă pe cale artificială. Luminescența a devenit obiectul unor cercetări științifice profunde și serioase. Studiului ei și-au dăruit timpul oameni de știință ca Petrov, Becquerel, Stokes, Vavilov și alții.

Există mai multe tipuri de luminescență; vom enumera cîteva dintre ele.

Unele substanțe, de exemplu marmora, amestecurile de anumite săruri, diamantul, pot radia o lumină slabă în cazul unei încălziri neînsemnate. Există și compuși chimici care luminează dacă li se micșorează puternic temperatura, ajungîndu-se pînă la minus 180°C , adică la temperatura la care aerul se găsește în stare lichidă. Acest tip de luminescență se numește termoluminescență.

Gazele rarefiate care se găsesc în așa-numitele tuburi cu descărcări în gaze, emit o lumină strălucitoare atunci cînd prin ele circulă un curent electric. În funcție de natura gazului, lumina poate avea diferite culori: roșie, albastră, violetă, galbenă etc.

Lumina emisă de un gaz, care apare la trecerea unui curent electric prin acesta, se numește electroluminescență.

În cursul desfășurării anumitor reacții chimice, substanțele care participă la aceste reacții emit lumină. Acest fenomen se numește luminescență de natură chimică.

Din această categorie face parte luminescența fosforului galben, care se oxidează lent în prezența aerului. De regulă,

combinarea acestui element cu oxigenul este însoțită de o emisiune de lumină destul de intensă.

În natură există și alte substanțe care, intrînd în reacție de combinație cu oxigenul, radiază în acest caz o lumină strălucitoare de cele mai diferite nuanțe. Multe insecte posedă această proprietate; luminescența lor este provocată de procese chimice. Dintre aceste insecte, cele mai cunoscute sînt „licuricii”.

Cunoscutul călător și cercetător al regiunii Ussuri, V. K. Arseniev, un profund cunoscător al naturii, povestea astfel despre licuricii care viețuiesc în taiga :

„Noaptea era liniștită, tocmai așa cum le place insectelor nocturne. Ceea ce am văzut m-a uimit atît de mult, încît am uitat cu desăvîrșire de musculițe și priveam ca fermecat.

Intregul văzduh era plin de scînteii albastrii licăritoare. Erau licuricii. Lumina trimisă de ei era tremurătoare și nu apărea niciodată mai des decît la o secundă. Urmărind o asemenea scînteie, se putea urmări zborul fiecărei insecte în parte. Licuricii aceștia nu apar dintr-odată, ci treptat, cîte unul. Se spune că popoarele migratoare din Rusia, văzînd pentru prima dată această lumină licăritoare, au tras în ea cu arcurile și au fugit înspăimîntați. Acuma nu erau insecte izolate ci mii și milioane. Ele zburau în iarbă, jos deasupra pămîntului, se furișau printre arbuști, se ridicau sus deasupra pomilor. Luminau insectele, licăreau și stelele. Era un adevărat joc de lumini”.

În afară de insectele luminoase, există și unele varietăți de pești marini și alte vietăți din mări și oceane, capabile de a emite lumină. Luminează de asemenea și unele tipuri de bacterii care trăiesc în mare.

Proprietatea de a emite lumină apare și la unele feluri de ciuperci și bucăți de lemn putred, numite în mod obișnuit putregaiuri.

Toate aceste cazuri se încadrează în categoria luminescenței chimice.

Dacă în întuneric deplin se rupe o bucată de zahăr, pentru scurt timp ea luminează slab. O serie întreagă de substanțe, în special cele de structură cristalină, luminează dacă sînt deformatate : dacă sînt rupte, comprimate, turtite etc.

Acest tip de emisiune de lumină se numește triboluminescență. Denumirea provine de la cuvîntul grecesc tribo, care înseamnă „eu frec”.

Nu este lipsit de interes, din punct de vedere fizic, fenomenul fluorescenței, care a căpătat această denumire de la mineralul fluorit. El constă în faptul că unele substanțe încep să emită o lumină slabă, după ce au fost iradiate cu lumină. Această proprietate o posedă: feldspatul (fluoritul), soluția de sulfat de chinină în apă, platinocianura de bariu, minereul de zinc, așa-numita sticlă de uraniu și alți compuși chimici.

Prezintă un efect fluorescent observabil și unele lichide, de exemplu petrolul, unele sorturi de uleiuri și alte substanțe.

În fine, există încă un tip de luminescență care a căpătat denumirea de fosforescență. Acest termen este și el de origine grecească: cuvântul fos înseamnă lumină.

Unii compuși ai metalelor din familia alcalino-pămîntoasă (calciul, stronțiul, bariul) cu sulful sau seleniul și cu adaosuri mici de metale grele, de exemplu cupru, argint, plumb, stibiu, bismut și altele, fiind topite împreună cu unele săruri, capătă noi proprietăți și anume: dacă în prealabil, în decursul unui interval de timp oarecare, ele sînt luminate cu raze vizibile sau în special ultraviolete, iar apoi se întrerupe iluminarea, ele încep să lumineze singure destul de strălucitor. Compușii semiconductori de acest fel au căpătat denumirea de fosfori. Nu trebuie să se confunde aici elementul fosfor, care — trebuie să spunem — este capabil de a emite lumină fără nici un fel de participare a luminii exterioare, cu o substanță chimică complexă, care are aceeași denumire, însă este pronunțată altfel (accentul cade pe ultima vocală, o).

Prin urmare, fosforii sau, cum mai sînt numiți altfel, luminoforii, sub acțiunea razelor care cad asupra lor, capătă o nouă proprietate: capacitatea de a emite lumină în decursul unei perioade de timp mai mult sau mai puțin îndelungate. Timpul de luminescență proprie al luminoforului este diferit la diversele substanțe; el poate dura de la fracțiuni de secundă pînă la cîteva luni.

Fosforescența poate apărea dacă asupra luminoforului se dirijează un flux de lumină, de raze ultraviolete și Roentgen, sau acesta este supus unui bombardament electronic.

Dacă un fascicul de electroni este îndreptat spre un ecran acoperit cu o substanță fosforescentă sau fluorescentă, el va începe să lumineze intens.

Această proprietate, după cum se va vedea mai tîrziu, este folosită în aparate foarte importante, în particular la microscopul electronic, oscilografele catodice, tuburile video-reproductoare (tuburi kinescop) și în aparatele pentru văzut

pe întuneric. Atît fosforescența cît și fluorescența reprezintă cazuri particulare ale luminescenței, care au căpătat denumirea de fotoluminescență.

Dar ce se întîmplă cu materia în timpul fosforescenței sau fluorescenței?

Să încercăm să lămurim latura fizică a problemei. Lumina emisă de orice sursă este de fapt rezultatul luminii emise de diferiți atomi sau molecule care alcătuiesc substanța sursei de lumină. Acțiunea luminoasă totală a întregii cantități de atomi capabili de a emite lumină constituie tocmai acel flux de lumină pe care îl percepem privind spre sursa de lumină. La orice emisiune de lumină, atomii corpului care luminează pierd energie. De aceea, pentru a obliga un corp oarecare să emită lumină fără a i se modifica compoziția chimică, este necesar să i se furnizeze o oarecare cantitate de energie din afară și numai atunci corpul va putea să înceapă să lumineze. Această energie poate fi furnizată și sub forma unui flux de fotoni.

Lumina, fiind absorbită de materie, se poate transforma integral în căldură. Uneori, lumina absorbită de un corp contribuie la desfășurarea unor reacții chimice. În unele cazuri, razele luminoase creează un curent electric care circulă pe fire; aici energia luminoasă este transformată în energie electrică.

În general, energia luminoasă se poate transforma — în anumite condiții — în orice alte feluri de energie.

Dar atunci apare următoarea întrebare: lumina, ajungînd la o substanță și fiind absorbită de ea, nu poate oare să se transforme într-o altă formă de energie, iar apoi să se transforme din nou în energie luminoasă? Firește, acest lucru este posibil.

Cînd lumina cade pe suprafața unei substanțe fotoluminescente și este absorbită de aceasta, înseamnă de fapt că atomii izolați ai substanței absorb părți mici de energie luminoasă, mărindu-și posibilitățile energetice, adică rezervele lor de energie potențială. În acest caz, toți atomii care au absorbit lumină trec din starea normală într-o stare „excitată”, care se caracterizează prin faptul că atomul excitat devine capabil de a emite radiații. În consecință, de îndată ce o substanță fluorescentă începe să fie supusă acțiunii luminii, atomii ei trec din starea normală într-o stare excitată. Intrucît starea excitată corespunde unui echilibru instabil, iar atomii nu se pot găsi întotdeauna — pentru un timp înde-

lungat — în această stare, ei înșiși încep să emită lumină simultan cu începerea iluminării. Se înțelege că din punctul de vedere al mecanismului procesului, între fluorescență și fosforescență nu există o diferență de principiu. Și într-un caz și în celălalt are loc o acumulare, o înmagazinare de energie luminoasă care cade pe substanță și care nu se va transforma în alt fel de energie. După încărcarea corespunzătoare cu „lumină”, substanța fosforescentă — absorbind o cantitate oarecare de energie luminoasă — a căpătat prin aceasta capacitatea de a ceda înapoi această energie în decursul unui interval de timp mai lung sau mai scurt, nu sub formă de căldură, electricitate sau sunet, ci numai sub formă de lumină. Iată de ce unii compuși semiconductori naturali sau creați artificial sînt capabili să devină fluorescenți sau fosforescenți.

Evident, orice substanță luminescentă, supusă acțiunii luminii, se compune din atomi excitați și atomi normali. Firește, numărul acestora din urmă este mai mare, deoarece lumina absorbită nu pătrunde în întreaga grosime a substanței. În plus, absorbind lumina incidentă, și trecînd din starea normală în cea excitată, atomii — devenind capabili de a emite lumină — încep să profite practic imediat de această proprietate, adică încep să radieze ei înșiși. Este ușor de înțeles că după ce au radiați, acești atomi — anterior aflați în stare excitată — devin iarăși normali pînă cînd nu vor absorbi din nou o parte de energie corespunzătoare. Toate aceste procese complicate, naturale, au loc în deplină concordanță cu legea conservării energiei.

Fizicianul englez Stokes, ocupîndu-se de studiul amănunțit al proprietăților fotoluminescente ale diverselor substanțe, a descoperit legea care acum îi poartă numele.

În conformitate cu legea lui Stokes, lungimile de undă ale luminii emise de o substanță fluorescentă sînt mai mari decît lungimile de undă ale luminii incidente. Cu alte cuvinte, acest fapt este echivalent cu a spune că dacă o substanță capabilă de a deveni fluorescentă este iluminată cu lumină verde, ea va emite în acest caz raze galbene, sau portocalii, sau roșii — în general orice fel de raze, numai lungimea lor de undă să fie mai mare decît lungimea de undă a luminii verzi primare, care a provocat luminescența.

Legea lui Stokes nu are aproape de loc excepții și este valabilă pentru majoritatea substanțelor. Ea este, în esență, unul dintre cazurile particulare ale unei proprietăți mai gene-

rale a luminii — natura cuantică a acesteia. Din punctul de vedere al teoriei cuantice a luminii, legea lui Stokes devine cât se poate de lămurită. În adevăr, să presupunem că la suprafața unei substanțe luminescente ajunge un foton cu energia

$$W = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

unde c este viteza luminii. Fotonul este absorbit în întregime de o moleculă. Datorită acestei absorbții molecula devine excitată, adică electronul corespunzător, care face parte din alcătuirea moleculei respective, trece la un nivel de energie mai înalt. După aceea, același electron, rămânând un timp oarecare în stare excitată, revine din nou la nivelul lui de energie anterior. În acest caz molecula radiază un foton de energie $W_0 = \frac{hc}{\lambda_0}$. Este absolut evident că, pe baza legii conservării energiei, W_0 nu poate fi mai mare decât W . W_0 poate fi sau egal cu W , sau — în majoritatea cazurilor — este mai mic decât W . De aici rezultă că

$$\frac{hc}{\lambda_0} \leq \frac{hc}{\lambda},$$

de unde se obține

$$\lambda \leq \lambda_0.$$

Atomul sau molecula, sub acțiunea luminii, trece din starea normală în cea excitată. În această stare atomul se poate găsi sau pentru fracțiuni de secundă neînsemnate, sau — dimpotrivă — pentru un timp extrem de îndelungat. Exterior, aceasta se va manifesta prin durata fotoluminescenței. În primul caz avem de-a face cu o fluorescență, iar în cel de-al doilea — cu o fosforescență.

În rîndul compușilor semiconductori există substanțe cu proprietăți fotoluminiscente foarte pronunțate, care și-au găsit aplicații suficient de numeroase.

13. UNELE GENERALIZĂRI

În paginile precedente s-a făcut încercarea de a ajuta cititorul să înțeleagă proprietățile electrice neobișnuite ale semiconductoarelor. Este util să facem acum unele generalizări și să tragem câteva concluzii. Prima și cea mai prin-

cipală concluzie este aceea că mecanismul apariției conductibilității electrice în semiconductoare se deosebește din punct de vedere principal, calitativ, de mecanismul apariției conductibilității electrice la metale. În metale, întotdeauna și în toate împrejurările, există electroni liberi. Ei nu trebuie să fie obținuți printr-un anumit proces fizic. În semiconductoare însă, electronii de conducție trebuie să fie creați sau prin intermediul căldurii, sau al unei radiații, sau prin bombardarea cu particule, sau prin orice alt purtător de energie. De aceea, rezistența semiconductoarelor depinde în mare măsură de temperatură și se micșorează odată cu creșterea acesteia.

O a doua deosebire și, fără îndoială, esențială, a semiconductoarelor față de metale constă în numărul diferit de electroni liberi din unele și din celelalte. Se știe că concentrația electronilor liberi dintr-un metal este foarte mare, în orice caz nu mai mică decât numărul de atomi, adică de ordinul 10^{23} pe 1 cm^3 de metal și, ceea ce este foarte caracteristic, ea nu depinde practic de loc de nici un fel de condiții exterioare: temperatură, umiditate, presiune și alți factori. În cazul semiconductoarelor pitice, însă, la temperaturile normale, concentrația purtătorilor de curent — adică a electronilor sau golurilor — este considerabil mai mică și depinde în mare măsură de temperatură.

Ca o particularitate importantă a multor semiconductoare trebuie considerată mobilitatea mare a purtătorilor de curent, a cărei valoare — în cazuri izolate — ajunge pînă la cîteva zeci de mii. Astfel, de exemplu, mobilitatea electronilor în compusul InSb ajunge pînă la $80\,000 \text{ cm}^2/\text{V.s.}$ Mobilitatea electronilor în germaniul n este de $\sim 4\,000 \text{ cm}^2/\text{V.s.}$, iar în siliciul n — de $1\,200 \text{ cm}^2/\text{V.s.}$, în timp ce mobilitatea electronilor liberi ai unui metal nu depășește cîteva sute.

În aceeași măsură este importantă și o altă proprietate a unor semiconductoare: valoarea mare a „duratei de viață” a purtătorilor de curent — electroni sau goluri — care la siliciul pur atinge $200 \mu\text{s}$, iar la germaniu — $1\,000 \mu\text{s}$.

Posibilitatea de a se crea semiconductoare cu proprietăți electrice stabilite în prealabil, prin introducerea în substanța semiconductoare a unor adaosuri adecvate, joacă un rol fundamental în practica electronicii semiconductoarelor.

Trebuie să se menționeze că procesele fizice care se desfășoară la limita de separație a două semiconductoare, cu conducție prin goluri și conducție electronică, care vin în contact

unul cu altul, nu se observă aproape de loc în sistemele metalice.

Toate acestea constituie numai particularitățile principale, fundamentale ale substanțelor semiconductoare. Aceste particularități precum și alte proprietăți ale semiconductoarelor fac ca ele să fie materiale de neînlocuit, din care se realizează aparate remarcabile ce au pătruns literalmente în toate domeniile științei și tehnicii.

CAPITOLUL II

SEMICONDUCTOARELE ÎN ȘTIINȚĂ ȘI TEHNICĂ

1. TERMOREZISTENȚELE

Secolul nostru se caracterizează prin dezvoltarea intensă a automaticii și pătrunderea metodelor de automatizare în cele mai diferite domenii ale științei și tehnicii. Folosirea instalațiilor automate se dovedește, în multe cazuri, excepțional de eficace. Probleme tehnice dintre cele mai importante, anterior greu de rezolvat, capătă soluții simple și elegante cu ajutorul diferitelor mașini automate.

Multe instalații automate includ, drept unul dintre elementele cele mai importante, o termorezistență semiconductoare sau, cum mai este numită uneori, un termistor.

Principiul funcționării termistoarelor este bazat pe proprietatea semiconductoarelor de a-și modifica considerabil rezistența în cazul variației temperaturii lor. În timp ce coeficientul de temperatură γ al rezistenței, pentru metalele pure, are valori cuprinse între limitele 0,003—0,004 pe 1°C , la unele semiconductoare valoarea acestui coeficient este de 10—20 ori mai mare și, de regulă, are semn opus. Variația puternică a rezistenței semiconductoarelor în funcție de temperatură este tocmai factorul ce a permis să se construiască termorezistențele sensibile, care, în consecință, reprezintă rezistențe semiconductoare de volum, cu coeficient de temperatură al rezistenței de valoare mare. Se înțelege de la sine că pentru confecționarea termistoarelor se pot folosi substanțe semiconductoare cu conducție atât electronică, cât și prin goluri.

Construcția termistorului este cât se poate de simplă. Unei bucățele de semiconductor i se dă forma de fir, tijă, plăcuță subțire, bilă, petală rotundă sau oricare altă formă (fig. 16). În corpul semiconductorului se presează doi electrozi de curent, cu ajutorul cărora termistorul se introduce în circuitul unei instalații oarecare. Rezistența semiconducto-

rului se alege în așa fel, încît ea să fie considerabil mai mare decît rezistența altor elemente de curent ale circuitului. Aceasta se face pentru ca intensitatea curentului care trece prin circuit să fie, în linii mari, determinată de rezistența termistorului, sau la urma urmelor, de temperatura lui, adică o dată cu creșterea temperaturii să se mărească, iar dacă temperatura scade, să se micșoreze.

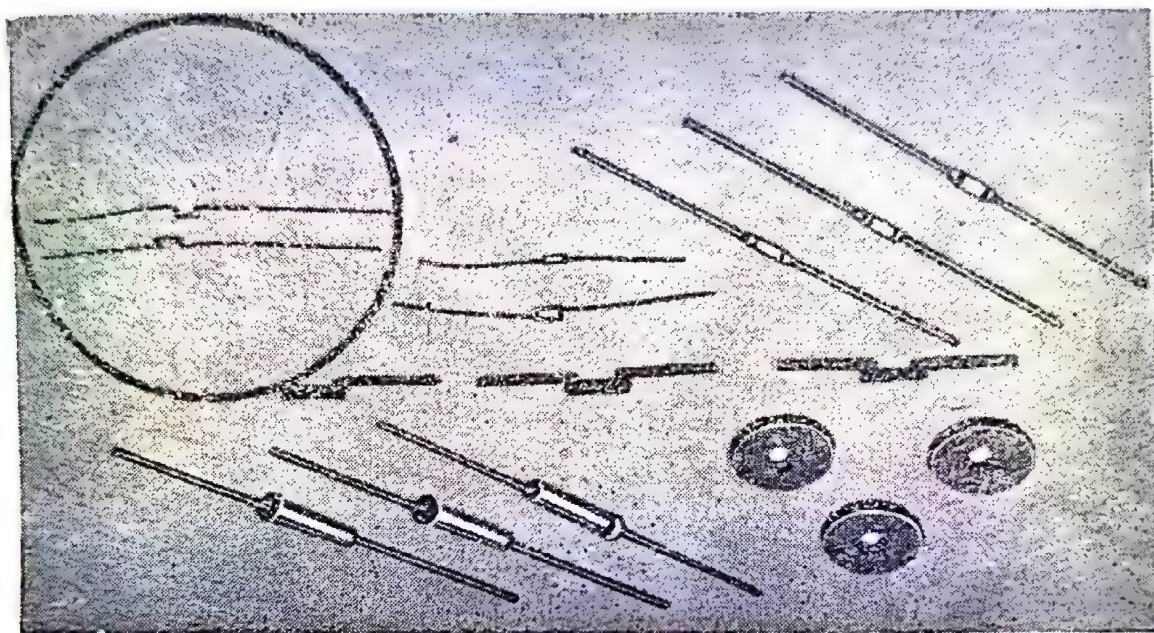


Fig. 16. Aspectul exterior al termorezistențelor

Folosirea acestui principiu este absolut suficientă pentru a se putea alcătui zeci de dispozitive dintre cele mai diferite. Vom da câteva exemple. Un termistor conectat într-un circuit electric special cu sursă de tensiune și galvanometru (aparat destinat să măsoare curenți de intensitate mică), determină cu mare precizie temperatura mediului. Termistorul este introdus el însuși în mediul a cărui temperatură trebuie să fie măsurată, iar galvanometrul este etalonat direct în grade. O dată cu variația temperaturii se va schimba și intensitatea curentului și acul galvanometrului va devia, indicînd precis numărul de grade.

Folosind termistoare, s-a reușit să se realizeze circuite pentru determinarea la distanță a temperaturii obiectelor care se află la o distanță relativ mare de aparatul de măsurat. Prin intermediul unor asemenea circuite se măsoară temperatura la mari înălțimi, temperatura solului și a apei la dife-

rite adâncimi, a cărbunelui în depozitele de cărbune, a grînelor în silozuri etc.

Uneori, procesul de determinare a temperaturii prezintă complicații foarte mari. Cum să se măsoare, de exemplu, temperatura frunzei unei plante sau temperatura sîngelui într-o venă? Este foarte dificil să se introducă un termometru într-un vas sanguin. Un microtermistor de construcție specială simplifică extrem de mult rezolvarea unor probleme de acest fel. El constituie, în funcție de aplicație, o bilă de semiconductor cu diametrul de la 5 pînă la 50 μ (fig. 17),

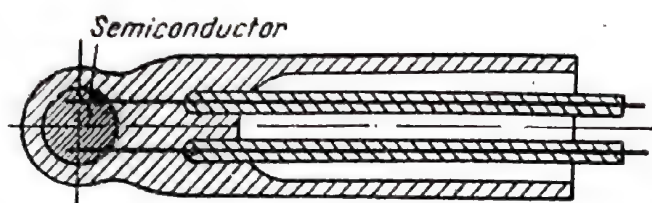


Fig. 17. Construcția unei microtermorezistențe realizate de V. G. Karmanov, colaborator științific al Institutului de agrofizică

fixată pe un tub capilar de sticlă, sau poate avea orice alt aspect. O asemenea bilă mică poate fi introdusă chiar și în interiorul inimii omenești sau al oricărui alt organ. Printr-un procedeu asemănător a fost determinată și temperatura

frunzelor multor plante, care se găsesc în cele mai variate condiții de existență și au fost studiate multilateral procesele lor de schimb de căldură cu mediul exterior, ceea ce reprezintă un mare interes științific.

În ultimii ani, microtermorezistențele au început să fie folosite pentru diagnosticarea timpurie a unor maladii greu de identificat ale organelor interne, în special a tumorilor maligne. S-a dovedit că tumorile au o temperatură ceva mai mare decît țesuturile sănătoase. Se cunosc cazuri cînd microtermorezistența a permis să se determine precis configurația și amplasarea unei tumori în creierul omului și a ajutat chirurgului să intervină cît se poate de sigur și precis.

Există un număr destul de mare de circuite în care se folosesc termorezistențe, special destinate să regleze temperatura. Un asemenea circuit, de exemplu, poate fi următorul. Termorezistența se găsește într-un termostat în care trebuie să se mențină o temperatură constantă și este conectată în circuitul unui releu electromagnetic sensibil. La creșterea temperaturii, releul anclanșează și întrerupe circuitul bobinajului termostatului. Cînd temperatura va scădea pînă la valoarea prescrisă, releul conectează din nou alimentarea ter-

mostatului. Se înțelege de la sine că aparatul este gradat în prealabil pentru temperaturi necesare fiecărui caz concret.

Pentru pornirea unui motor electric cu excitația în paralel este necesar să se mărească treptat intensitatea curentului. În acest scop se folosește în mod obișnuit un reostat de pornire, care este scos treptat din circuit pe măsură ce turația motorului se mărește. În ultimii ani, în locul unui reostat de pornire a început să se folosească din ce în ce mai des un termistor conectat în circuitul rotoric al motorului. La aplicarea tensiunii, prin bobinajul motorului, în consecință și prin termistor, începe să circule curentul. În termistor se degajează căldură, temperatura lui se mărește, iar rezistența scade. Scăderea rezistenței condiționează creșterea curentului, iar simultan cu aceasta și mărirea turației motorului, pînă cînd motorul va ajunge în regimul lui de funcționare obișnuit. Bineînțeles, creșterea curentului nu poate continua la infinit, deoarece intensitatea lui este limitată de rezistența circuitului, în care intră — firește — și rezistența bobinajului motorului. Întreg acest proces de pornire durează, în funcție de tipul de rezistență, de la 30 pînă la 180 s.

Circuitul de limitare a curentului, pe care tocmai l-am descris, este realizat și în alte variante, pentru cele mai diverse scopuri. În asemenea circuite termistorul are rolul de releu de timp, care își găsește aplicații în multe cazuri. Adesea, termorezistența este combinată cu un releu electromagnetic, care constituie mecanismul de execuție. Un avantaj caracteristic al releului de timp cu termorezistență constă în faptul că el poate funcționa tot așa de bine atît în curent continuu, cît și în curent alternativ.

Există destul de multe circuite în care receptoarele de curent sînt legate în serie. În cazul unui asemenea mod de conectare, este suficient ca un receptor să iasă din funcțiune pentru ca funcționarea celorlalte să fie întreruptă. Pentru a evita acest lucru se folosesc uneori termorezistențe.

Pentru simplitate, vom examina un circuit format din patru lămpi cu incandescență conectate în serie. În paralel cu fiecare lampă se leagă o termorezistență de valoare suficient de mare (fig. 18). La trecerea curentului prin circuit, prin fiecare termorezistență va circula un curent neglijabil, deoarece rezistența lămpii este considerabil mai mică decît rezistența termistorului. Cînd prin termistor circulă un curent de valoare mică, în el se va degaja o cantitate neînsemnată de căldură, care este însă disipată în atmosfera înconjură-

toare. Ca urmare, temperatura termistorului nu va crește. Să admitem acumă că una dintre lămpi (de exemplu L_2) s-a ars. În primul moment, căderea de tensiune se concentrează mai ales la bornele termistorului TR_2 , conectat în paralel cu lampa care a ieșit din funcțiune și prin acesta va circula un curent de intensitate mai mare, care va începe să încălzească termorezistența. Simultan cu încălzirea treptată a termistorului, va începe să crească intensitatea curentului care circulă prin el, pînă cînd intensitatea curentului care trece prin circuitul lămpilor va atinge o valoare aproximativ egală cu cea

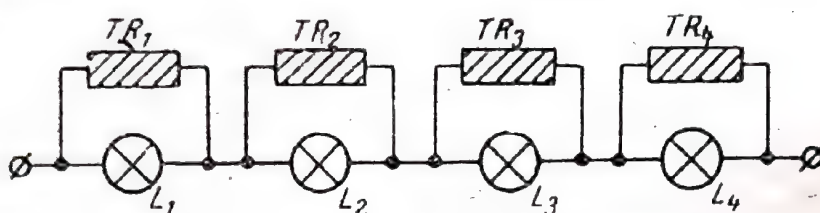


Fig. 18. Modul de conectare a termorezistențelor de șuntare

anterioară și lămpile vor ilumina din nou strălucitor.

Pentru funcționarea în bune condițiuni a instalației descrise este necesar numai să se aleagă parametri corespunzători ai termorezistențelor conectate.

Folosirea termistoarelor semiconductoare a dat posibilitatea să se construiască aparate care măsoară viteza fluxurilor de lichide și gaze, reglează temperatura, stabilizează o tensiune electrică, determină gradul de vid într-un vas din care se pompează aerul, efectuează măsurări în înaltă frecvență, compensează variațiile unor diferite mărimi fizice, determină valoarea conductibilității termice a corpurilor solide, lichide și gazoase, efectuează analiza gazelor și fac multe alte operații.

Să vedem, de exemplu, cum se poate determina viteza unui flux de lichid, să zicem țitei, care circulă printr-o conductă, cu ajutorul unui termistor. În acest scop, în interiorul conductei se introduce un termistor cu suprafața relativ mare și de formă aerodinamică. Termistorul este conectat într-un circuit și prin el începe să circule un curent electric. Trecerea curentului este totdeauna însoțită de o creștere a temperaturii corpului prin care circulă curentul. În consecință termistorul se va încălzi. Temperatura lui ar crește continuu dacă nu ar exista schimbul de căldură. Lichidul care circulă prin conductă, în cazul nostru țiteiul, răcește însă termistorul și anume cu atît mai mult, cu cît viteza lui de curgere este mai mare.

Aceasta face ca pentru fiecare valoare a vitezei lichidului care curge, termistorul să capete o anumită temperatură strict determinată. O temperatură strict determinată a termistorului corespunde însă unei intensități strict determinate a curentului care circulă prin el. Prin urmare, rezultă că o dată cu creșterea vitezei de curgere a lichidului prin conductă se accentuează schimbul de căldură cu suprafața termistorului, datorită cărui fapt temperatura lui scade, iar concomitent cu aceasta se micșorează și intensitatea curentului indicată de galvanometru, ale cărui diviziuni sînt gradate nu în unități de curent, ci în unități care exprimă viteza de curgere. Un principiu aproximativ analog se află la baza construcției vacuummetrelor cu semiconductoare, niște aparate care măsoară gradul de vid. În acest caz, însă, schimbul de căldură diferit este legat de rarefierea diferită a aerului.

În ultimul timp, termistoarele au început să fie folosite cu succes în tehnica bolometrelor. Bolometrul este un aparat care măsoară energia de radiație. Construcția bolometrelor se bazează pe principiul transformării energiei radiante în energie termică.

Elementul principal al bolometrului este un termistor de forma unei plăcuțe subțiri, confecționată dintr-o substanță semiconductoare specială. Această plăcuță este conectată într-un circuit electric cu galvanometru. Cînd plăcuța semiconductoare este în obscuritate, acul galvanometrului este la zero. Este suficient însă ca spre plăcuță să se dirijeze o rază de lumină, pentru ca acul galvanometrului să devieze aproape imediat. Aceasta se întîmplă deoarece razele luminoase, fiind absorbite de plăcuța semiconductoare, o încălzesc, iar acest fapt — la rîndul lui — duce la scăderea rezistenței plăcuței și prin întregul circuit începe să circule un curent de intensitate mai mare. Iată, în principiu, funcționarea și construcția bolometrului. În instalațiile reale folosite în exploatare, elementul semiconductor fotosensibil este amplasat în vid într-un balon metalic sau de sticlă, prevăzut cu o fereastră dintr-un material transparent oarecare, ce lasă să treacă razele de lungimi de undă corespunzătoare.

Sensibilitatea unui bolometru cu semiconductor este extrem de mare. Aceasta permite folosirea lui pentru cele mai variate scopuri, inclusiv pentru detectarea corpurilor încălzite, așezate la o distanță relativ mare de aparat. Astfel, de exemplu, un bolometru așezat în focarul unei oglinzi parabolice,

poate „percepe“ radiația termică a feței unui om care se află la o distanță de peste 100 m de oglindă.

Toate corpurile, fără excepție, emit radiații infraroșii, invizibile pentru ochi, indiferent dacă corpul este încălzit puternic sau nu. Această împrejurare permite ca bolometrul să detecteze un asemenea corp încălzit chiar în cazul când el se găsește la o distanță relativ mare, de câțiva kilometri. Să presupunem că zboară un avion. Motorul lui are o temperatură relativ înaltă și, din această cauză, el emite radiații infraroșii intense, captate foarte bine de un bolometru cu semiconductor. Iată și un alt exemplu. În timpul nopții navighează un vapor, iar un observator nu-l vede. Temperatura unei părți oarecare a vaporului, de exemplu a coșului lui, este mai mare decât temperatura aerului. Acest fapt este suficient pentru ca bolometrul să poată detecta prezența vasului. Exact în același fel se detectează tancurile, automobilele, motocicletele și alte obiecte care au părți încălzite.

Goniometrarea termică (așa se numește această metodă de detectare a obiectelor încălzite) completează radiolocația în cazurile când aceasta din urmă nu poate fi folosită.

Cît de mare este sensibilitatea dispozitivelor bolometrice actuale se poate aprecia după faptul că cu ajutorul lor s-a reușit să se înregistreze razele infraroșii reflectate de lună.

Cu fiecare an se extinde din ce în ce mai mult domeniul aplicațiilor termistoarelor care în afară de sensibilitatea la variații de temperatură, posedă o serie întreagă de proprietăți prețioase: dimensiuni mici, greutate redusă, rezistență mecanică mare, durată de serviciu îndelungată. Ele nu au nici un fel de piese mobile, nu necesită contacte speciale și sînt extrem de simple în ce privește mînuirea.

2. REZISTENȚE NELINIARE

Asemănător cu dispozitivele care tocmai au fost descrise în ce privește principiul de funcționare, este și un alt dispozitiv semiconductor — descărcătorul pentru timpul de furtună. El îndeplinește o funcțiune foarte utilă: protejează liniile de înaltă tensiune împotriva avariilor, în cazul unei lovituri de trăsnet.

Intregul teritoriu al U.R.S.S. este acoperit de o rețea de linii de înaltă tensiune, artere care alimentează cu energie electrică orașele cu industria lor puternic dezvoltată. În

aproape cea mai mare parte a anului, aceste linii de transport sînt expuse unui pericol serios — lovitura trăznetului.  n timpul căderii trăznetului, în linie apare o supratensiune, care adesea scoate din funcțiune transformatorul de la o sta ie. Cum să se protejeze linia împotriva acestei calamit  i?  n acest scop, pe st lpii pe care se montează conductorii se instalează paratr znete, dar acestea nu sînt întotdeauna de folos. Vine atunci în ajutor descărcătorul cu semiconductor.

Func ionarea descărcătorului se bazează pe faptul că rezistența semiconductorului,  ncep nd de la o valoare oarecare a intensității c mpului electric, începe să scadă brusc dacă c mpul electric continuă să crească. Construcția descărcătorului este realizată în a a fel,  nc t să includă unul sau — de cele mai dese ori — mai multe discuri din substanță semiconductoră, conectate în serie (fig. 19). Prin intermediul unor conductoare metalice, capătul superior al descărcătorului se leagă la linie, iar cel inferior — la p m nt.  n condiții normale, rezistența descărcătorului este at t de mare,  nc t curentul preluat de ea de la linie este foarte mic.  n momentul căderii trăznetului, c nd în linie se creează o supratensiune considerabilă, rezistența descărcătorului scade mult  i curentul de descărcare se scurge la p m nt. Acest proces durează p n  c nd tensiunea liniei devine din nou normală.

Descărcătoarele pentru timp de furtună constituie unul dintre tipurile de a a-numite rezisten e neliniare — dispozitive confecționate din materiale la care se observă o abatere de la legea lui Ohm. Rezisten ele neliniare au multiple aplicații  i în toate tipurile posibile de instalații radio-

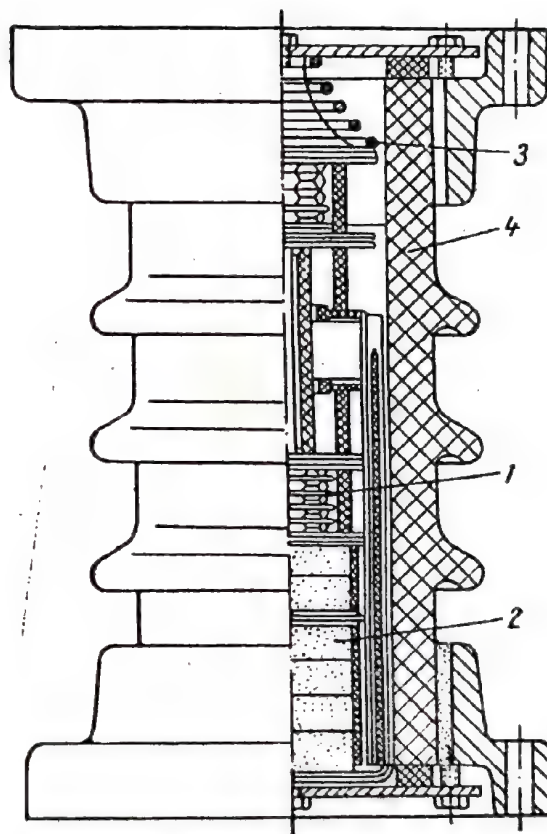


Fig. 19 Construcția unui descărcător pentru timp de furtună:

1 — spa ii disruptive, 2 — discuri de vilit, 3 — carcasă de porcelan, 4 — resort de apăsare

tehnice. Construcția lor este simplă. Din pulbere de carbură de siliciu (SiC), adăugându-se o substanță liantă, se presează discuri de dimensiuni mici, care apoi sînt supuse unui anumit tratament termic. Pe discuri se presează electrozi metalici cu borne pentru contacte exterioare. Uneori, un asemenea disc se introduce într-o carcasă ceramică închisă ermetic, care îl protejează împotriva acțiunii dăunătoare a umidității aerului.

Rezistențele neliniare, numite adesea și varistoare, se lipesc ușor, cu un aliaj de lipit obișnuit, direct la conductoarele circuitului sau pot fi montate în acesta într-un alt mod.

3. CONTOARE CU CRISTAL

Mecanismul apariției electronilor de conducție în semiconductoare creează toate condițiile necesare pentru folosirea lor în fizica nucleară experimentală.

Metodica cercetărilor experimentale legate de studiul nucleului atomic este extrem de complicată și implică un număr considerabil de aparate complicate. Orice simplificare a unui aparat, mărirea siguranței lui de funcționare și micșorarea dimensiunilor lui are o mare importanță. Printre aceste aparate complicate există unele a căror destinație constă în numărarea cu precizie a particulelor elementare: protoni, deuteroni, particule α și altele, care sînt emise de un obiect oarecare în timpul experienței. În ultimii ani, pentru simplificarea aparaturii din laboratoarele de fizică, au început să se folosească contoare cu semiconductoare. Ideea pe care se bazează un contor de particule cu semiconductoare, sau — cum mai este numit uneori — cu cristal, este simplă. Dintr-o substanță semiconductoare adecvată se confecționează o plăcuță de dimensiuni mici, care este conectată într-un circuit electronic special. Se dirijează spre plăcuță fluxul de particule al căror număr trebuie determinat. Particulele, pătrunzînd în semiconductor, provoacă apariția în acesta a electronilor de conducție, ceea ce se manifestă instantaneu prin creșterea curentului electric care trece prin plăcuța semiconductoare și prin aparatele de măsurat corespunzătoare. Acestea din urmă sînt etalonate în așa fel, încît în locul intensității curentului să indice direct numărul de particule incidente la suprafața plăcuței semiconductoare. Se înțelege de la sine că realizarea unui contor cu cristal s-a dovedit posibilă numai

datorită faptului că numărul de electroni de conducție care apar este proporțional cu numărul de particule elementare incidente la suprafața contorului cu semiconductor.

4. ELEMENTE DE INCALZIRE

Obținerea unor temperaturi înalte în cuptoare este o problemă care are o mare importanță practică. Multe procese tehnologice se bazează pe folosirea unui tratament termic la temperaturi înalte.

În numeroase cazuri, sînt extrem de necesare cuptoare electrice de încălzire cu volum mic, însă la temperaturi relativ înalte, care ajung pînă la 1500°C . Folosirea în acest scop a unor sîrme obișnuite, din aliaje de tip nicrom, nu dă rezultate, deoarece aceste aliaje se topesc sau se oxidează chiar la temperaturi care depășesc cu puțin 1000°C . Există însă și metale cu temperatură de topire înaltă. Dintre acestea fac parte: paladiul, platina, rodiul, iridiul, ruteniul, osmiul, molibdenul, wolframul și altele. Primele șase metale nu sînt folosite în scopul menționat, mai ales din cauza costului lor ridicat. Molibdenul arde repede atunci cînd este încălzit în aer, transformîndu-se în anhidridă de molibden (MoO_3). Wolframul se oxidează repede la temperatura de călire la roșu și este folosit numai pentru cuptoare speciale cu vid. Alte metale greu fuzibile, din diferite cauze, nu pot fi nici ele folosite drept elemente de încălzire electrice.

Utilizarea semiconductoarelor în acest scop s-a dovedit foarte eficace. Unele substanțe semiconductoare posedă nu numai o temperatură de topire înaltă, dar și o mare stabilitate în aer. Compușii de acest fel sînt potriviți pentru confecționarea elementelor de încălzire ale cuptoarelor electrice pentru temperaturi înalte. Dintre aceste cuptoare fac parte, de exemplu, cuptoarele cu elemente de încălzire confecționate sub formă de bare din carbură de siliciu cu anumite adaosuri.

Prin proprietățile lor fizice, barele de carbură de siliciu satisfac practic toate condițiile necesare. Coeficientul lor de dilatare liniară este foarte mic și, de aceea, barele nu se deformează în timpul încălzirii. În plus, dozînd judicios cantitatea de diferite adaosuri introduse, se pot obține bare cu rezistență specifică diferită, ceea ce prezintă avantaje incontestabile.

La majoritatea acestor cuptoare, recipientul de încălzire este un cilindru în pereții căruia se introduc barele de carbură

de siliciu, conectate una cu alta fie în serie, fie în paralel, fie — în fine — mixt. Capetele barelor sînt metalizate, pentru îmbunătățirea contactului electric. La acestea se conectează conductoarele care merg la bornele cuptorului, prin intermediul cărora cuptorul este legat la o rețea de curent alternativ cu tensiunea de 220 V.

Diferitele tipuri de cuptoare cu carbură de siliciu sînt calculate pentru diverse puteri. Ele permit încălziri pînă la 1500°C.

5. CELULE REDRESOARE SEMICONDUCTOARE

O importanță mereu crescîndă în diferite ramuri ale tehnicii capătă celulele redresoare semiconductoare de curent alternativ.

Datorită faptului că transportul în curent continuu la distanțe mari este legat de pierderi considerabile de energie, centralele electrice industriale produc numai curent alternativ. Totuși, în unele ramuri ale tehnicii se folosește curentul continuu. Astfel, de exemplu, în industria metalurgică unele metale pure se obțin pe cale electrolitică, adică prin trecerea unui curent continuu printr-o baie electrolitică. Argintarea, nichelarea, cromarea, în general acoperirea pieselor cu un strat metalic subțire, se realizează de asemenea cu ajutorul unor procese electrolitice. Tramvaiele, troleibuzele și alte cîteva tipuri de mijloace de transport folosesc numai curentul continuu. La fel, curentul continuu este necesar și pentru încărcarea acumulatorilor. Prin urmare, apare problema acută a obținerii curentului continuu din curent alternativ. Această problemă a fost de mult rezolvată. În acest scop se folosesc redresoare de tipuri, construcții și sisteme diferite: redresoare de mare putere cu vaporii de mercur, grupuri motor-generator, redresoare cu tuburi electronice. Toate acestea, bineînțeles, posedă anumite avantaje și, natural, dezavantaje. Deficiența principală este randamentul relativ scăzut al funcționării lor, care — pe deasupra — mai depinde și de tensiunea de lucru. În virtutea acestui fapt, transformarea curentului alternativ în continuu este întotdeauna însoțită de pierderi destul de mari. Unele tipuri de redresoare au o durată de serviciu redusă. Toate tipurile de redresoare necesită o întreținere de zi cu zi și o permanentă supraveghere. În plus, printre instalațiile redresoare nu există nici una care să fie absolut convenabilă pentru diferite scopuri și diverse re-

gimuri de exploatare. Această situație a inspirat cercetătorilor ideea necesității de a se căuta alte procedee de redresare a curentului alternativ. Folosirea în acest scop a semiconductoarelor s-a dovedit a fi mai rațională, mai avantajoasă din punct de vedere economic și cea mai comodă metodă de transformare a unui fel de curent în altul.

În primul capitol al acestei cărți s-a arătat că un sistem format din două semiconductoare, unul electronic și altul cu goluri, care sînt în contact unul cu altul, poate redresa curentul alternativ. Rezistența unui asemenea sistem, în funcție de sensul curentului, devine cînd foarte mare, cînd relativ mică. Ca rezultat, curentul va circula de preferință într-un singur sens, în timp ce în celălalt sens el va fi foarte mic.

Din însăși esența acestui fenomen rezultă imediat principiile care stau la baza construcției celulelor redresoare cu semiconductor. Tehnologia confecționării lor este elaborată în așa fel, încît să se realizeze un contact sigur între un semiconductor electronic și unul cu goluri. Pe ce cale se înfăptuiește aceasta? Există mai multe mijloace. Cel mai utilizat mijloc se bazează pe binecunoscuta proprietate a semiconductoarelor de a căpăta un mecanism de conductibilitate electrică fie electronic, fie prin goluri, prin influența adaosurilor corespunzătoare introduse în substanța semiconductoare. Această proprietate remarcabilă permite să se creeze o joncțiune $p-n$ într-o substanță semiconductoare de aceeași compoziție chimică, fără a se recurge la contactul a două semiconductoare diferite, ceea ce ar complica extrem de mult rezolvarea întregii probleme. Să studiem, ca exemplu, tehnologia confecționării celulelor redresoare cu oxid cupros. Aceasta ne va ajuta să înțelegem cum se obține în practică o joncțiune $p-n$.

Dintr-o plăcuță de cupru cu grosimea de 1 mm se ștanțează discuri de dimensiunile necesare, avînd în centru o deschizătură de diametru mic pentru trecerea bulonului de asamblare. Discurile ștanțate sînt curățate cu grijă și supuse (pentru degresarea completă a cuprului) unei spălări minuțioase cu o soluție de 30% sodă caustică și apoi în apă curgătoare. Discurile tratate cu sodă caustică sînt cufundate timp de 15 secunde în acid azotic concentrat, iar apoi sînt spălate, timp de 3—5 minute, în apă curgătoare, sau cel mai bine în apă distilată. După spălare urmează uscarea discurilor pe hîrtie de filtru sau într-un termostat.

Se efectuează apoi operația principală: discurile spălate și uscate sînt așezate două cîte două pe un suport din oțel

rezistent la temperaturi înalte, care se introduce într-un cuptor electric încălzit pînă la o temperatură de 1020—1040°C. Temperatura cuptorului se controlează cu grijă. Discurile de diametre mai mari se introduc în cuptor nu pe un suport metalic, ci înșirate pe o tijă de oțel.

În cuptor, toate părțile exterioare ale discurilor de cupru se acoperă, după 10—15 minute, cu un strat de oxid cupros (Cu_2O) avînd grosimea de aproximativ 0,1 mm. Părțile ascunse ale discurilor, îndreptate spre suportul metalic, nu se oxidează practic de loc, datorită accesului dificil al oxigenului la suprafețele lor. La drept vorbind, în cazul unui asemenea procedeu de așezare, discurile aflate direct pe suportul metalic constituie un fel de garnituri. Ele sînt destinate special acestui scop și servesc vreme îndelungată.

Proprietățile electrice ale oxidului de cupru depind în mare măsură de procesul ulterior de răcire a discurilor. Pentru obținerea unor rezultate optime, discurile fierbinți sînt scoase din cuptor și introduse foarte repede într-un alt cuptor, aflat alături. În al doilea cuptor se asigură trecerea treptată de la temperatura de oxidare la o temperatură mai scăzută, la care se stabilește cea mai avantajoasă distribuție a impurităților în grosimea stratului de Cu_2O . Temperatura celui de-al doilea cuptor variază de obicei de la 450 pînă la 600°C. În el discurile sînt ținute, în funcție de dimensiunile lor, de la 8 pînă la 5 minute, apoi sînt răcite imediat cu apă curgătoare rece.

În timpul cît discurile se găsesc în cel de-al doilea cuptor, pe stratul de oxid cupros se formează un strat de oxid cupric (CuO) slab conducător, care se îndepărtează prin cufundarea rondelilor timp de 3—5 minute într-o soluție de 30% acid azotic (HNO_3). Apoi, discurile se spală și se usucă. După toate aceste operații, pe suprafața de oxid cupros se depune așa-numitul electrod superior. Există mai multe procedee de depunere a acestuia. Vom vorbi despre unul dintre ele. Se pregătește o soluție de 7,5% șelac în alcool etilic. La 70 de părți de soluție de șelac se adaugă 30 părți de pulbere fină de grafit. Cu întregul amestec, se acoperă cu grijă suprafața de oxid cupros a discului. După uscare, pe stratul de grafit se depune — prin metoda pulverizării — un strat metalic.

Dacă un disc cu oxid cupros este introdus într-un circuit care conține un generator de tensiune alternativă, atunci va

circula un curent perceptibil numai într-un singur sens — cel de trecere sau direct. În sens invers, intensitatea curentului va fi mult mai mică. Sensul de trecere corespunde minusului la cupru, adică la electrodul inferior, și plusul — la electrodul superior.

Ciclul tehnologic de confecționare a unui disc redresor cu oxid cupros, care a fost tocmai descris, este aranjat în așa fel, încât oxidul de cupru — prin proprietățile lui electrice — să constituie un mediu neomogen, format dintr-o parte cu conducție electronică și o parte cu conducție prin goluri. În timpul oxidării discului de cupru în primul cuptor și al răcirii lui ulterioare în cel de-al doilea, oxidul cupros — care aderă direct la cupru — se saturează cu cupru. Numărul suplimentar de atomi de cupru, care au în acest caz rolul de adaosuri donoare, comunică stratului de oxid cupros, care aderă la electrodul inferior, să apară un mecanism de conducție electronică. Straturile exterioare ale oxidului cupros conțin impurități de atomi de oxigen, care le atribuie o conducție prin goluri. La limita de separație între aceste

porțiuni de oxid cupros și cuprinzându-le parțial, se localizează stratul de blocare. Prin urmare, întreaga grosime a oxidului cupros constituie de fapt un fel de „sandviș” compus dintr-o parte cu goluri și una cu electroni, cu stratul de blocare la mijloc (fig. 20).

Un disc redresor de acest fel nu poate suporta tensiuni înalte. De aceea se conectează în serie mai multe discuri, formînd coloane redresoare (fig. 21). În funcție de destinația

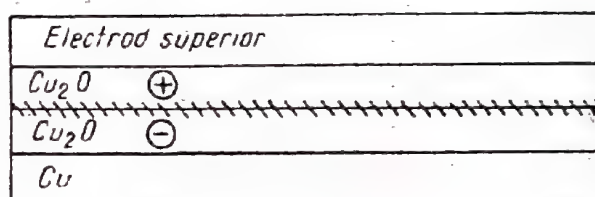


Fig. 20. Structura schematică a unui redresor cu oxid cupros. Regiunea hașurată reprezintă stratul de blocare

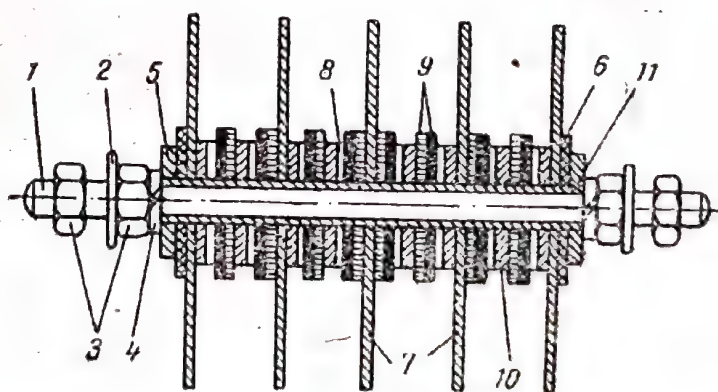


Fig. 21. Construcția unei coloane din discuri cu oxid cupros:

- 1 — bulon de asamblare, 2 — șalbă, 3 — piuliță, 4 — șalbă,
- 5 — șalbă de apăsare, 6 — șalbă izolantă, 7 — radiatoare,
- 8 — șalbă de plumb, 9 — disc redresor, 10 — șalbă de distanțare, 11 — tub izolant

redresorului, coloanele se assemblează din grupuri formate din discuri legate în serie, în paralel sau mixt.

Celulele redresoare cu oxid cupros nu constituie unicul tip de celule redresoare semiconductoare. Aplicații tot atât de vaste au și celulele redresoare cu seleniu. În ultimii ani, se răspîndesc din ce în ce mai mult celulele (diodele) redresoare din germaniu.

Celulele redresoare cu semiconductoare sînt mult folosite în tehnica redresării și în prezent, în ce privește indicii lor, au întrecut pe toți predecesorii lor. Ele se confecționează simplu, au o durată de serviciu îndelungată și rezistență mecanică mare; în plus nu necesită circuit de încălzire, ca — de exemplu — tuburile electronice redresoare. Avantajul principal al redresoarelor semiconductoare moderne construite din germaniu constă în randamentul lor ridicat care atinge 98%. În ciuda dimensiunilor mici, redresoarele cu germaniu sînt capabile să redreseze curenți de sute de amperi și există toate motivele să se creadă că în viitorul apropiat ele vor ocupa un loc preponderent în tehnica redresării.

6. DIODE CU CRISTAL*)

Acum cîteva zeci de ani, cînd tocmai începuseră să fie folosite în tehnica telecomunicațiilor primele receptoare fără tuburi electronice, detectorul cu cristal — cu ajutorul căruia se transformau semnalele recepționate — a avut un rol primordial. La început, pentru detecție se utilizau cristale naturale, de exemplu galena, pirita, zincita, casiterita, carborundul, arseno-pirita, calcopirita și altele.

Detectorul cu cristal era format dintr-o capsulă în care era lipit un cristal detector oarecare și un resort mobil de contact cu vîrful ascuțit. Cînd se lucra cu un asemenea detector, trebuia să se găsească pe cristal punctul necesar, ceea ce era foarte incomod.

Timp de cîteva ani, detectoarele cu cristal au dominat tehnica telecomunicațiilor, pînă cînd a început fabricarea pe scară industrială a tuburilor electronice, care au provocat o adevărată revoluție în radiotehnică. O dată cu apariția tuburilor electronice, detectoarele cu cristal au fost obligate să treacă pe planul al doilea. Pătrunderea tuburilor electronice în radiotehnică a fost atât de puternică și triumfală, încît nu

*) Mai sînt denumite și „diode semiconductoare“

mai exista nici o îndoială că detectoarele cu cristal erau de-
tronate pentru totdeauna. Se părea că noua tehnică electro-
nică, mai perfecționată, va înregistra, în analele ei de dezvoltare,
numai pe scurt și în trecere, faptul că au existat cândva,
pentru foarte scurt timp, detectoarele cu cristal. Această pre-
viziune nu s-a adeverit însă de loc. Tocmai dezvoltarea
intensă a radiotehnicii a impus renașterea detectoarelor cu
cristal, fără de care ar fi imposibil să se rezolve în întregime
problemele legate de tehnica undelor foarte scurte. Războiul
distrugător cu fascismul german, care a necesitat eforturi
uriașe din partea lagărului progresist, a obligat fizicienii și
inginerii să-și dubleze și să-și tripleze ritmul cercetărilor
militare. Printre ultimele realizări au fost și instalațiile de
radiolocație al căror principiu de funcționare se bazează pe
folosirea undelor electromagnetice de lungime de undă foarte
scurtă. Foarte curînd s-a înțeles că pentru funcționarea în
bune condiții a instalațiilor de radiolocație este necesar ca
tuburile redresoare electronice să fie înlocuite cu alte dispo-
zitive. Este vorba de faptul că, în gama undelor centimetrice
capacitatea dintre electrozii tubului și timpul de trecere a
electronilor prin tub începe să joace un rol negativ, care
influențează puternic asupra funcționării radiolocatorului. In-
ginerii și fizicienii care se ocupau cu tehnica radiolocației au
ajuns la concluzia că se poate de corectă că cel mai bun
înlocuitor al tubului electronic poate deveni detectorul cu
cristal semiconductor. Pentru scopurile menționate era însă
necesar un detector cu parametri electrici deosebiți. În plus
era esențial să se realizeze un detector care să posede un
nivel de zgomot cât mai scăzut. Tipurile vechi de detectoare
cu cristale naturale, firește, nu erau potrivite pentru înlocui-
rea tuburilor electronice cu vid. Această situație a stimulat
începerea unor cercetări intense pentru elaborarea unor noi
tipuri de detectoare cu cristal, în mare măsură lipsite de
dezavantajele inerente tuburilor electronice. Curînd după ter-
minarea războiului, această problemă a fost în linii mari
rezolvată și radiotehnicienii care lucrează cu unde scurte au
avut la dispoziție un număr destul de mare de detectoare cu
cei mai diferiți parametri, confecționate din siliciu și germaniu.

Germaniul este un element chimic care posedă proprietăți
semiconductoare. El se găsește în grupa a IV-a a sistemului
periodic al lui Mendeleev. Numărul lui de ordine este 32,
iar greutatea atomică 72,6. Prin compoziția lui chimică, ger-
maniul se aseamănă cu carbonul, siliciul și staniul cenușiu.

Germaniul are o rețea cristalină de tipul celei a diamantului. Temperatura lui de topire este de 958°C , densitatea de 5.35 g/cm^3 , iar conductivitatea σ este cuprinsă între limite largi, care cuprind cel puțin cinci ordine de mărime: de la 1 000 pînă la $10^{-2} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$. Această gamă largă de valori ale lui σ se explică, ca și pentru toate felurile de semiconductoare, prin concentrația și tipul de adaosuri de atomi străini, introduși în rețeaua lui cristalină. Influența adaosurilor asupra proprietăților electrice ale germaniului joacă un rol important, în afară de toate și datorită faptului că atomii adaosurilor care aparțin grupei a III-a a sistemului periodic, de exemplu borul, aluminiul, galiul, indiul, taliul, comunică germaniului o conducție prin goluri, în timp ce impuritățile din grupa a V-a (vanadiul, stibiul, bismutul și altele) — îi comunică una electronică. Influența adaosurilor asupra proprietăților electrice ale germaniului este atît de mare, încît un atom de adaos la 10^7 — 10^8 atomi de germaniu îi mărește conductibilitatea electrică. Prin urmare, cu ajutorul unor cantități neînsemnate de atomi de adaosuri introduse în rețeaua cristalină a germaniului, se poate obține germaniu cu proprietăți electrice stabilite în prealabil, ceea ce are o importanță hotărîtoare, permițînd să se fabrice diode de germaniu cu parametri electrice foarte buni.

Detectorul de cristal cu germaniu este un redresor de curent alternativ care conduce bine curentul într-un sens (sensul de trecere) și rău în sens opus (sens de blocare). Să examinăm construcția lui.

Un cristal mic de germaniu, cu conducție electronică și avînd dimensiunile de aproximativ $1,5 \times 1,5 \times 0,5 \text{ mm}$, este lipit pe unul din cele două piciorușe ale detectorului. Suprafața exterioară a cristalului este șlefuită cu grijă și apoi supusă unei prelucrări chimice. Ca rezultat al acestei prelucrări, un strat superficial subțire al cristalului capătă noi proprietăți: conductibilitatea lui electrică devine cu goluri. În consecință, în locul unui cristal anterior omogen în ce privește proprietățile lui electrice, se obține un cristal în care germaniul cu conducție electronică vine în contact direct cu germaniul cu conducție prin goluri.

La celălalt picioruș al detectorului se fixează un resort de contact din sîrmă subțire de wolfram. Capătul liber al resortului este ascuțit. Ambele piciorușe ale detectorului se lipesc, cu un clei special, de o capsulă ceramică. Capătul ascuțit al resortului este apăsător pe cristal. Detectorul cu germa-

ni, al cărui aspect exterior și secțiune sînt arătate în fig. 22, posedă proprietăți de redresare foarte bune. Dacă prin acest element se lasă să treacă un curent electric, sensul direct de trecere va corespunde cazului cînd curentul merge de la resort spre cristal, adică atunci cînd la resort se află plusul, iar la cristal — minusul.

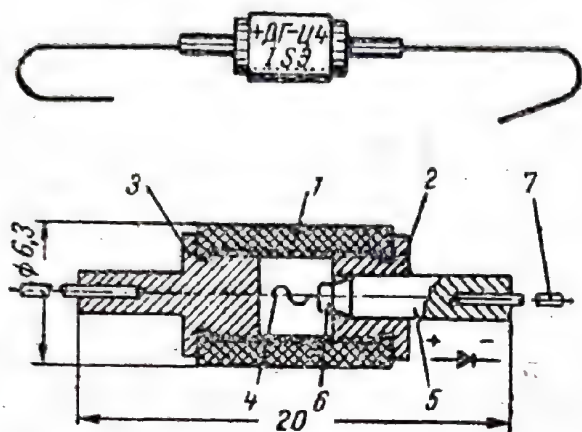


Fig. 22. Aspectul exterior și secțiune printr-un detector cu germaniu cu contact punctiform tip ДГ-Ц4 (dimensiunile în milimetri):

1 — bucsă ceramică, 2 și 3 — flanșe metalice, 4 — sondă de wolfram, 5 — montura cristalului, 6 — cristal de germaniu, 7 — borne metalice

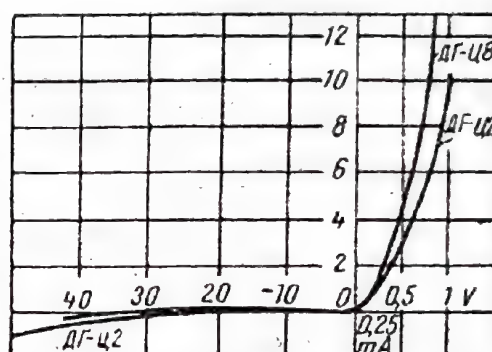


Fig. 23. Caracteristicile tensiune-curent ale diodelor cu germaniu ДГ-Ц2 și ДГ-Ц8

În fig. 23 sînt reprezentate caracteristicile tensiune-curent ale detectoarelor cu germaniu de înaltă tensiune. Din aceste caracteristici reiese că coeficientul de redresare al detectoarelor cu germaniu este excesiv de mare.

La tensiuni joase, de circa 1 V, acest coeficient poate atinge valori mai mari decît 10^5 .

Detectoarele cu germaniu fabricate de industria sovietică pot funcționa sigur pînă la frecvența de 150 MHz.

În afară de detectoarele cu germaniu, au căpătat o largă răspîndire și detectoarele cu siliciu, în care — în locul cristalelor cu germaniu — sînt montate cristale de siliciu.

Detectoarele de tipul descris se numesc cu contact punctiform, deoarece suprafața cristalului redresor vine în contact cu vîrfurile ascuțite ale unui resort metalic și, de aceea, suprafața de contact electric este mică.

Diodele cu cristal cu contact punctiform sînt folosite pe scară foarte largă în tehnica frecvențelor ultrînalte, unde ele sînt dispozitive practic de neînlocuit. Capacitatea neglijabilă a detectorului, absența circuitelor de încălzire, dimensiunile

mici, rezistența mecanică mare, durata de serviciu îndelungată, forma caracteristicii tensiune-curent și alte calități ale detectoarelor cu cristal le fac să fie elemente extrem de importante și necesare pentru multe instalații radiotehnice.

Marile avantaje ale detectoarelor cu cristal moderne, care — pe deasupra — nu necesită reglare și acordare, le-au deschis vaste perspective. Dioda cu cristal actuală este un dispozitiv care devine din ce în ce mai necesar pe măsură ce timpul trece. Acest fapt se observă deosebit de bine considerînd exemplul ultimelor descoperiri care au permis crearea unor noi tipuri de diode cu cristal ce posedă posibilități și perspective mult mai mari decît predecesoarele lor. Aceste remarcabile dispozitive, construite conform principiului joncțiunilor $p-n$, au provocat o adevărată revoluție în radiotehnică. Spre deosebire de detectoarele cu contacte punctiforme descrise mai sus, noile tipuri de diode au căpătat denumirea de diode cu joncțiune sau diode $p-n$.

Să le descriem.

Ideea pe care se bazează diodele de germaniu cu joncțiune nu introduce nimic nou din punct de vedere principal, și de fapt a fost folosită la elaborarea tehnologiei sistemelor redresoare examinate mai sus. Ea constă în crearea, într-un cristal de germaniu monolit, a două regiuni cu mecanism de conducție diferit: prin goluri și prin electroni. Întregul sens al acestei idei constă tocmai în faptul că pentru obținerea efectului de redresare nu este necesar ca un cristal de germaniu cu goluri să fie pus în contact cu un cristal de germaniu electronic, ci prin metode artificiale să se obțină, dintr-un cristal electronic, un cristal care posedă un mecanism de conducție parțial electronic și parțial prin goluri. Între regiunea electronică și cea cu goluri ale cristalului, și cuprinzîndu-le parțial, apare o joncțiune $p-n$.

În ce mod se realizează în practică joncțiunea $p-n$? Pentru rezolvarea acestei probleme este necesar ca în germaniul electronic să se introducă adaosuri de elemente din cea de-a treia grupă a sistemului periodic, care — după cum se știe — comunică germaniului un mecanism de conducție prin goluri. Întreaga subtilitate a procesului constă însă aici în faptul că adaosurile introduse nu trebuie să pătrundă în întreaga grosime a germaniului, ci numai pînă la o anumită adîncime. Dacă adaosurile vor intra în întregul volum al cristalului, atunci tot cristalul va căpăta conducție prin goluri. Dacă însă adaosurile vor pătrunde numai pînă la o adîncime oarecare d ,

cu bună știință mai mică decât grosimea l a cristalului, atunci domeniul de adâncime d va poseda conductibilitate prin goluri, iar restul — electronică. Lucrând la rezolvarea acestei probleme, fizicienii au învățat pînă la urmă să introducă în așa fel adaosurile, încît ele să pătrundă numai pînă la o adâncime mică din grosimea cristalului și, totodată, să formeze o limită de separație, o joncțiune $p-n$ suficient de netă, care să despartă partea cu goluri a cristalului de cea electronică.

În principiu, o joncțiune $p-n$ poate fi realizată în germaniu prin diferite mijloace tehnice și cu ajutorul unor diverse elemente din grupa a III-a a sistemului lui Mendeleev, însă răspîndirea cea mai largă, cel puțin în prezent, a căpătat-o procedeul descris în cele ce urmează. Se confecționează o plăcuță subțire din monocristal de germaniu de mare puritate, cu conducție electronică și pe una dintre suprafețele lui se topește o bucătică de indiu. Topirea indiului se face într-o cavitate bine vidată. În timpul topirii indiului, atomii lui difuzează pe un front larg, pînă la o anumită adâncime în cristalul de germaniu; ca rezultat, pe întinderea acestei zone germaniul capătă conducție prin goluri. După aceea, la ambele suprafețe ale cristalului se aplică și se fixează electrozi, cristalul se montează într-o montură specială și dioda cu germaniu capătă forma ei definitivă (fig. 24).

Inventarea diodelor cu germaniu cu joncțiune a constituit un mare pas înainte. Spre deosebire de alte redresoare, diodele cu germaniu posedă un randament foarte mare, care atinge 98%. În plus, diodele cu germaniu pot suporta tensiuni inverse de peste 1 000 V. Ele lasă să treacă în sensul direct un curent a cărui densitate atinge 1 000 A/cm², la o tensiune de numai 1 V. Durata lor de serviciu este de cel puțin 10 000 ore. Diodele cu germaniu au dimensiuni mici, posedă o rezistență mecanică bună, sînt ușor de mînuit, și au — în comparație cu alte tipuri de redresoare — o serie întreagă de avantaje importante. Firește, capacitatea diodelor cu germaniu cu joncțiune este mai mare decât a detectoarelor

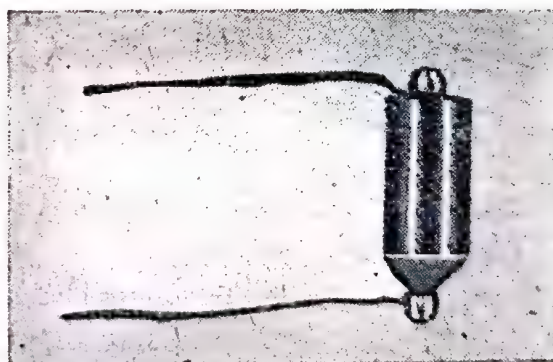


Fig. 24. Aspectul exterior al unei diode cu germaniu cu joncțiune

cu germaniu cu contact punctiform, de aceea ele nu sînt folosite în circuitele pentru frecvențe ultrînalte, dar sînt utilizate cu succes acolo unde frecvența nu depășește 50 kHz.

7. TRIODE SEMICONDUCTOARE

Uriasele succese obținute de fizicieni și ingineri în ce privește crearea diodelor cu siliciu și germaniu i-au stimulat să se ocupe și de o problemă absolut nouă: să caute alte căi de amplificare a oscilațiilor electrice, folosind în acest scop, substanțe semiconductoare. Rezolvarea acestei probleme a necesitat cîțiva ani de muncă susținută și s-a sfîrșit printr-o reușită deplină: în 1948 a fost creat primul tip de triodă cu germaniu cu contacte punctiforme, care a căpătat denumirea de tranzistor.

Pentru un tranzistor cu contacte punctiforme se folosește germaniu cu conducție electronică și cu rezistivitatea $\rho > 10 \Omega \cdot \text{cm}$. Tehnologia confecționării tranzistoarelor este în multe privințe asemănătoare cu procesele tehnologice pe care se bazează fabricarea detectoarelor cu germaniu cu contact punctiform. Dintr-un monocristal de germaniu se taie plăcuțe extrem de subțiri, cu dimensiunile de circa $1,5 \times 1,5 \times 0,5 \text{ mm}$. Suprafața interioară a plăcuței se metalizează și servește drept bază pentru tranzistor. Suprafața superioară a acestuia se șlefuieste, se lustruiește și se prelucrează chimic, apoi cristalul se lipește pe un picioruș metalic. Pe suprafața superioară a cristalului se așază, la o distanță de 50 pînă la 250μ una de alta, niște sîrmulițe ascuțite (sonde), confecționate fie din bronz fosforos, fie din wolfram. Ambele puncte ale cristalului de germaniu, cu care sondele vin în contact direct, au caracteristici tensiune-curent corespunzătoare unui detector cu tensiune de lucru inversă mare. Tranzistorul asamblat este conectat într-un circuit așa cum se arată în fig. 25. Unul dintre contactele punctiforme (în desen, cel din stînga), se numește emiter și, prin analogie cu un tub electronic cu vid, poate fi comparat cu catodul. Al doilea contact punctiform (cel din dreapta, în figură) se numește colector și corespunde anodului unui tub electronic. Emiterului i se aplică, de la o sursă de tensiune continuă, un potențial pozitiv mic V_e , ceea ce corespunde cu sensul direct de trecere al curentului prin cristal. La colector se aplică un potențial V_c negativ în raport cu baza și care depășește, în ce privește valoarea absolută, potențialul V_e aplicat emiterului. Semnul diferenței

de potențial dintre contactul punctiform al colectorului și bază condiționează sensul curentului în circuitul colectorului, care — spre deosebire de curentul emiterului — este negativ. Prin urmare, rezistențele contactelor punctiforme ale emiterului și colectorului diferă una de alta.

În circuitul emiterului, așa cum se arată în fig. 25, se conectează o tensiune alternativă, care trebuie amplificată. În circuitul colectorului se introduce rezistența adițională R de la bornele căreia se ia tensiunea alternativă amplificată.

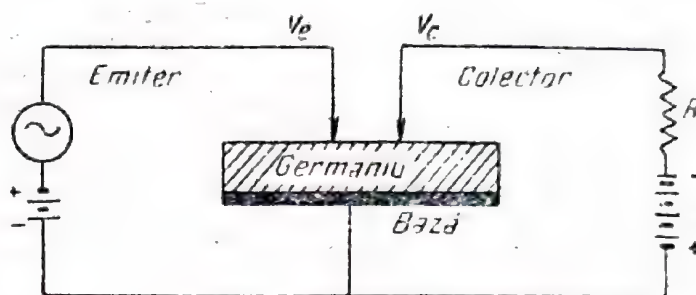


Fig. 25. Schema de conectare a unui tranzistor su contacte punctiforme

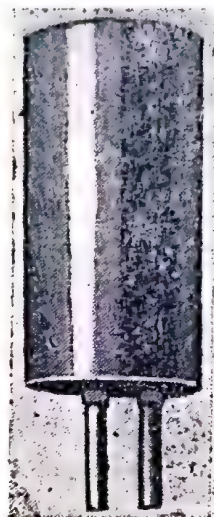
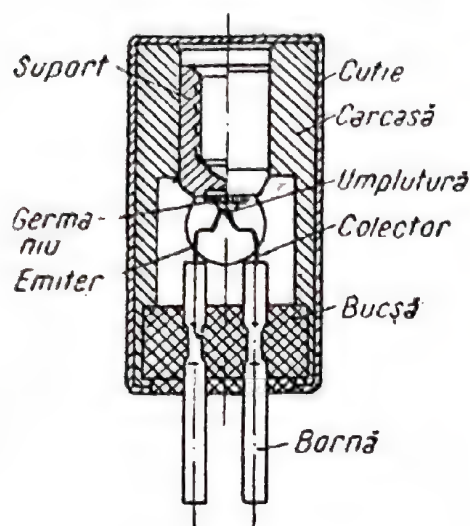
Deoarece peste tensiunea continuă a emiterului se suprapune tensiunea alternativă de la sursa exterioară, sincron cu variația potențialului emiterului se va schimba și intensitatea curentului din circuitul lui. Această variație a intensității curentului din circuitul emiterului provoacă o variație corespunzătoare a intensității curentului din circuitul colectorului.

Variațiile mici ale tensiunii din circuitul emiterului provoacă, în circuitul colectorului, variații considerabile ale tensiunii alternative, care se culeg la bornele rezistenței de sarcină R .

Valoarea amplificării de tensiune pe care o dă un tranzistor poate atinge câteva sute.

În fig. 26 sînt reprezentate aspectul exterior și o secțiune printr-un tranzistor cu germaniu cu contacte punctiforme. Imediat după tranzistoarele cu germaniu cu contacte punctiforme, au fost descoperite tranzistoarele cu joncțiune, cu care se pot obține puteri mai mari. Construcția tranzistoarelor cu germaniu cu joncțiune se bazează pe realizarea, într-un monocristal de germaniu, a unor joncțiuni $p-n-p$ sau $n-p-n$. Ca exemplu vom examina pe scurt una dintre metodele de obținere a unui tranzistor $p-n-p$. Această metodă este deja cunoscută cititorilor. Pe suprafețele opuse ale unei plăcuțe extrem de subțiri tăiate dintr-un monocristal de germaniu cu conducție electronică, se topesc bucățele de indiu — element din grupa a III-a a sistemului periodic. În procesul de topire, un

număr oarecare din atomii indiumului difuzează în germaniu. Ca rezultat, partea din mijloc a cristalului de germaniu va poseda, ca și mai înainte, un mecanism de conducție electronic, în timp ce regiunile din margine vor prezenta o conducție prin goluri. La toate aceste trei regiuni ale cristalului — p , n și p — se



lipsește electrozi, cu ajutorul cărora tranzistorul poate fi conectat într-un circuit.

Mecanismul funcționării tranzistoarelor cu germaniu cu joncțiune se deosebește puțin, în principiu, de mecanismul funcționării celor cu contacte punctiforme. Particularitatea esențială care deosebește avantajos tranzistoarele cu joncțiune de cele punctiforme con-

Fig. 26. Aspectul exterior și secțiune printr-un tranzistor cu germaniu cu contacte punctiforme

stă în faptul că puterea de ieșire a primelor este considerabil mai mare. Pentru unele tipuri, valoarea puterii de ieșire poate atinge 100 W și chiar mai mult.

În fig. 27 este arătată secțiunea unui tranzistor cu joncțiune.

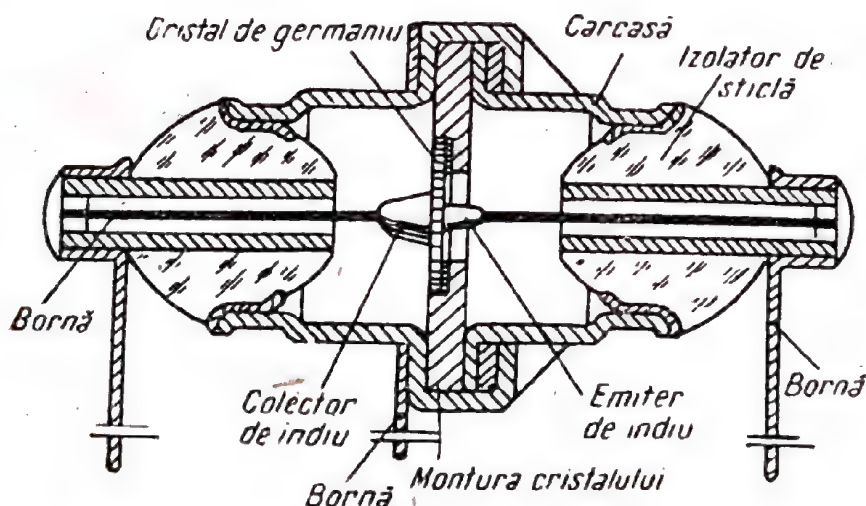


Fig. 27. Secțiune printr-un tranzistor cu germaniu cu joncțiune

Să studiem, folosind exemplul unui tranzistor cu germaniu cu contacte punctiforme, esența fizică a procesului de amplificare.

Fiecare punct al germaniului cu conducție electronică, cu care vin în contact direct sondele, are o caracteristică tensiune-curent corespunzătoare unei diode cu cristal. Cu alte cuvinte, în fiecare punct există o joncțiune $p-n$, condiționată de faptul că printr-o prelucrare specială se creează, pe suprafața germaniului n , un strat subțire de germaniu p . Când emiterului i se aplică, în sensul de trecere, un impuls de tensiune izolat, sub acțiunea cîmpului electric al impulsului, golurile trec din germaniul p în germaniul n . În literatura de specialitate acest fenomen a căpătat denumirea de injecție a purtătorilor de curent. Golurile injectate în germaniul n rătăcesc liber prin volumul acestuia pentru un interval de timp foarte scurt, de ordinul câtorva miimi de secundă. După acest „timp de viață”, purtătorii de curent în minoritate (golurile) din germaniul electronic, sub acțiunea cîmpului colectorului, reușesc să ajungă în zona joncțiunii $p-n$ a colectorului, ceea ce duce la o creștere considerabilă a conductibilității acestuia. Dacă înainte de aplicarea impulsului de tensiune rezistența joncțiunii $p-n$, în sensul de blocare, era mică, după ce în zona acestei joncțiuni pătrund golurile injectate de emiter, rezistența joncțiunii scade puternic. Ca rezultat, tensiunea bateriei conectate în circuitul colectorului se redistribuie în așa fel, încît cea mai mare parte a ei revine rezistenței de sarcină, de la care este apoi preluată.

Fenomenele care se petrec într-un tranzistor atunci cînd la emiter se aplică un impuls de tensiune izolat condiționează amplificarea de curent, de tensiune sau de putere a semnalului. Este cît se poate de evident că natura acestor procese rămîne aceeași și în cazul cînd emiterului i se va aplica nu un singur impuls, ci mai multe impulsuri care se succed unul după altul, sau o tensiune sinusoidală alternativă. În ultimul caz, în afară de semnalele care urmează a fi amplificate, emiterului i se aplică și o polarizare continuă. În fig. 28 este reprezentat aspectul exterior al unui tranzistor cu joncțiune.

Crearea diodelor semiconductoare și a tranzistoarelor a constituit o mare victorie a gîndirii

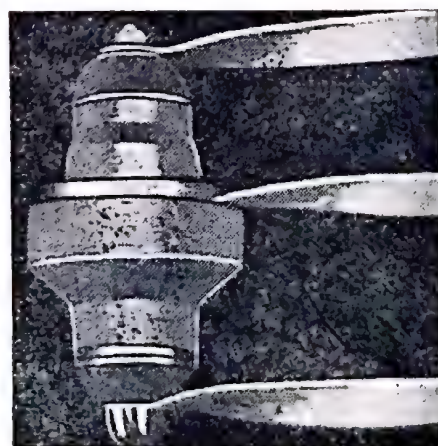


Fig. 28 Aspectul exterior al unui tranzistor cu germaniu cu joncțiune

fizice, oferind vaste și noi posibilități și perspective pentru radiotehnică. În comparație cu predecesoarele lor, tuburile electronice cu vid, diodele semiconductoare și tranzistoarele posedă o serie întreagă de avantaje inapreciabile. Ele au dimensiuni reduse, de câteva ori mai mici decât acelea ale tuburilor electronice. Durata lor de serviciu este considerabil mai lungă decât durata de serviciu a tuburilor. Ele au un randament ridicat, care ajunge pînă la 50% în cazul unui tranzistor, în timp ce randamentul unui tub electronic amplificator este mult mai mic. Diodele semiconductoare și tranzistoarele nu au circuite de încălzire și posedă o serie întreagă de alte avantaje extrem de importante. Toate acestea le fac să fie dispozitive excepțional de prețioase, iar în numeroase cazuri — de neînlocuit. Se pot da multe exemple care ilustrează această afirmație. Este suficient să spunem că în prezent se construiesc radioreceptoare ale căror dimensiuni depășesc numai cu puțin dimensiunile unei cutii de chibrituri. În aceste aparate, în locul tuburilor electronice se găsesc diode și tranzistoare de germaniu.

Pentru alimentarea lor, receptoarele și emițătoarele de acest fel necesită cantități foarte mici de energie electrică. Această împrejurare are adesea o importanță deosebit de mare. Aparatajul de dimensiuni mici poate fi pus în buzunar împreună cu bateriile de alimentare uscate. Posedînd o greutate mică el este de neînlocuit în campanie, expediții, excursii turistice etc. Folosirea lor la stațiile de mașini și tractoare, pentru comunicațiile între brigăzile de pe cîmp, va permite economisirea unei mari cantități de energie electrică și va permite să se renunțe la acumulatele deficitare. Datorită greutății mici, radioaparatajul de dimensiuni reduse prezintă un interes excepțional pentru avioane, unde are importanță fiecare kilogram de greutate în plus. În fig. 29 este arătat aspectul exterior al unui receptor de acest fel, montat pe ghidonul unei motociclete ușoare. El are dimensiuni relativ mari numai din cauza faptului că în aceeași cutie sînt amplasate nu numai receptorul cu un difuzor destul de puternic, dar și bateriile uscate.

Rezistența mecanică mare a diodelor și tranzistoarelor de germaniu permite ca toate instalațiile radiotehnice posibile să funcționeze în condiții de trepidații, vibrații, șocuri, în general acolo unde tuburile electronice nu pot fi folosite.

În ultimii ani, s-au răspîndit pe scară largă mașinile de calculat electronice. Ele sînt folosite cu succes în institutele

de cercetări științifice, în birourile de proiectare și construcție, în diferite organizații care se ocupă cu efectuarea calculelor și în alte instituții. Fiecare mașină conține, în circuitul ei, câteva mii de tuburi electronice, care ies relativ des din funcțiune și deranjează astfel ritmul de lucru impus. Acesta este



Fig. 29. Receptor cu diode și tranzistoare cu germaniu, montat pe ghidonul unei motociclete ușoare

un dezavantaj serios, dar în această privință nu se poate face de fapt nimic. O dată cu apariția elementelor de germaniu, situația s-a schimbat radical: în locul tuburilor electronice au început să se folosească diode și tranzistoare cu germaniu

și eficacitatea mașinilor de calculat s-a mărit simțitor, în timp ce costul exploatării lor și dimensiunile s-au micșorat.

Recent, s-a reușit să se construiască un radioemițător miniatură cu tranzistoare, care nu necesită nici un fel de alimentare electrică specială. Aceasta este înlocuită cu energia sonoră a vocii omenești. Microfonul acestui emițător transformă vibrațiile sonore în energie electrică, care este întru-totul suficientă pentru punerea în funcțiune a emițătorului.

Pe la mijlocul anului 1955 a intrat în funcțiune prima centrală telefonică cu 3 000 numere, în care toate tuburile electronice au fost înlocuite cu tranzistoare. Această schimbare a făcut ca viteza de comutare a numerelor să se mărească considerabil.

Am dat doar câteva exemple de aplicații ale diodelor și tranzistoarelor, însă chiar și aceste exemple, după câte ni se pare nouă, sînt mai mult decît suficiente pentru a înțelege ce importanță mare capătă în timpurile noastre aceste remarcabile dispozitive semiconductoare.

8. FOTOREZISTENȚELE

Proprietatea substanțelor semiconductoare de a-și micșora rezistența sub acțiunea luminii absorbite a fost folosită de fizicieni pentru crearea unor dispozitive numite fotorezistențe. Fotorezistența este construită în modul următor. Pe o plăcuță izolantă dintr-un material oarecare se depune un strat subțire de substanță semiconductoare fotosensibilă. Pe marginile stratului se așază niște electrozi metalici. Intre electrozi rămîne suprafața liberă a stratului de semiconductor, supusă acțiunii radiațiilor luminoase (fig. 30).

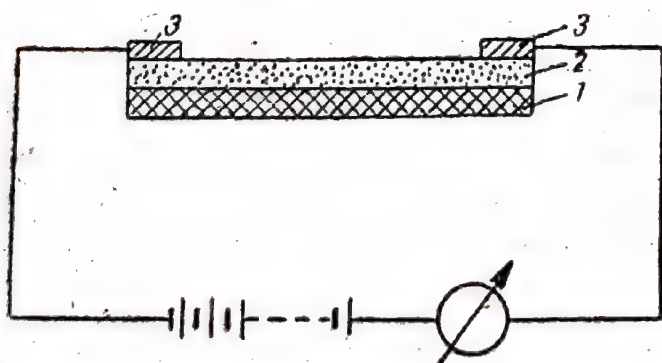


Fig. 30. Construcția schematică a unei fotorezistențe:

1 — suport izolant, 2 — str. semiconductor, 3 — electrozi

Fotorezistența este conectată într-un circuit cu sursă de tensiune și galvanometru. În majoritatea cazurilor, în locul galvanometrului se montează un releu electromagnetic. Când fotorezistența se află în obscuritate, prin circuit trece un curent destul de slab.

Este însă suficient ca ea să fie supusă acțiunii unei radiații corespunzătoare, pentru ca în circuit să se mărească aproape instantaneu intensitatea curentului, fapt ce va fi indicat de galvanometru sau de releu, care anclanșează rapid.

Diversele substanțe semiconductoare posedă proprietăți fotoelectrice diferite. Unele reacționează în special la lumina verde, altele la lumina roșie, altele la lumina albastră etc. Există semiconductoare care sînt foarte sensibile la radiațiile infraroșii. De aceea, orice fotorezistență prezintă o anumită sensibilitate spectrală, adică o variație a curentului fotoelectric în funcție de frecvența radiației. Această împrejurare extinde încă și mai mult domeniul aplicațiilor practice ale semiconductoarelor. În Uniunea Sovietică, cele mai răspîndite sînt fotorezistențele confecționate din sulfură de plumb, sulfură de bismut și sulfură de cadmiu. În fig. 31 este reprezentat aspectul exterior al unei fotorezistențe din monocristal de sulfură de cadmiu.

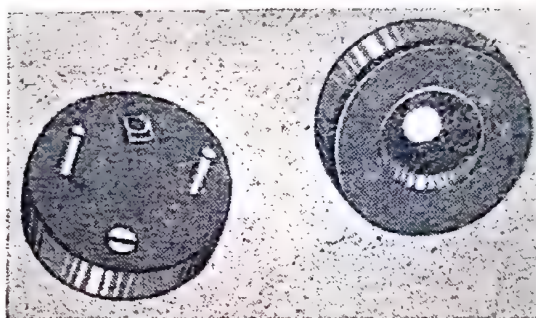


Fig. 31 Aspectul exterior al unei fotorezistențe din monocristal de sulfură de cadmiu

Fotorezistențele sînt folosite într-un mare număr de instalații automate și aparate diverse, aproape peste tot unde se utilizează fotoelemente, la a căror descriere vom trece acum.

9. CELULE FOTOELECTRICE GENERATOARE

De istoria celulei fotoelectrice semiconductoare sînt legate probleme tehnice interesante, inclusiv problema transformării directe a energiei solare în energie electrică, pe care oamenii de știință, tehnicienii și inventatorii s-au străduit mulți ani să o rezolve. Numeroase proiecte au intrat în arhiva științei, fără a mai fi de loc perfecționate, și această problemă a rămas nerezolvată pînă în secolul XX. Pînă la începutul deceniului al patrulea al veacului nostru, în acest domeniu nu au avut loc nici un fel de progrese însemnate, deși fuseseră create diferite tipuri de instalații solare. Ele erau însă voluminoase, incomode în exploatare, necesitau o întreținere permanentă și, ceea ce era mai important, aveau un randament scăzut.

Situația a început să se schimbe numai după ce, acum 25 de ani, academicianul A. P. Ioffe a arătat cu convingere și cu îndrăzneală că inventatorii nu mergeau pe calea cea bună și că soluția corectă consta în crearea, pentru acest scop, a unei celule fotoelectrice semiconductoare cu randament ridicat. A. P. Ioffe credea cu tărie că o celulă fotoelectrică de acest fel poate fi creată și că este necesar să se lucreze în această direcție. În acea perioadă aproape nimeni nu credea în posibilitatea de realizare practică a unor asemenea idei.

De pe vremea acestor previziuni au trecut aproximativ 25 ani. Fizicienii nu au irosit în zadar această perioadă de timp și au înregistrat o serie întreagă de victorii strălucite. Una dintre aceste victorii, fără îndoială, trebuie considerată crearea unei noi celule fotoelectrice semiconductoare, cu randamentul de 10%.

Celula fotoelectrică semiconductoare sau, cum mai este numită uneori, generatoare este un dispozitiv care transformă energia radiantă direct în energie electrică.

Există relativ multe tipuri de celule fotoelectrice, însă — în ce privește principiul de funcționare — ele se împart în numai două clase. Din prima fac parte toate tipurile de celule fotoelectrice bazate pe efectul fotoelectric exterior. Din a doua clasă fac parte celulele fotoelectrice semiconductoare cu strat de blocare, numite altfel și generatoare, care se disting deosebit de avantajos de toate celelalte tipuri de dispozitive fotoelectrice prin faptul că sub acțiunea radiației ele produc o forță electromotoare proprie, adesea egală cu câteva zecimi de volt în cazul expunerii directe la lumina solară.

Pentru a ne imagina mai clar importanța acestui fapt, vom recurge la compararea efectului fotoelectric exterior și celui interior. Primul se află la baza construcției tuburilor fotoelectrice cu vid sau umplute cu gaz, cel de al doilea — la baza fotorezistențelor. Pentru obținerea unor curenți electrici cât de cât perceptibili în tuburile fotoelectrice cu efect fotoelectric exterior, nu este însă suficientă numai acțiunea luminii. În afară de ea, este necesar ca între fotocathod și anod să se creeze un câmp electric de valoare necesară, care să asigure captarea de către anod a tuturor electronilor emiși. De aceea, aceste tuburi fotoelectrice funcționează în regimuri care prevăd conectarea obligatorie, în circuitul electric al tubului, a unei surse de tensiune continuă — o baterie uscată sau un acumulator. Fără sursă de tensiune tuburile fotoelec-

trice cu vid și cu gaz nu pot funcționa și, în consecință, se transformă în aparate absolut inutile.

O situație analogă există și în cazul fotorezistențelor; aici, sub acțiunea luminii absorbite, apar electroni de conducție care nu zboară în exterior ca în cazul precedent, ci rămân chiar în stratul semiconductor. Electronii și golurile eliberate de lumină capătă posibilitatea de a se deplasa haotic în întreaga masă a substanței; cu toate acestea, nu se va observa nici un fel de curent. Pentru ca într-o fotorezistență să apară curentul fotoelectric, este necesar de asemenea să se recurgă la o sursă exterioară de energie electrică, conectând în acest scop o bornă a fotorezistenței la polul pozitiv al unei baterii, iar cealaltă bornă — la polul negativ.

Necesitatea folosirii unei surse exterioare de tensiune se explică prin faptul că nici celulele fotoelectrice cu efect fotoelectric exterior, nici fotorezistențele, nu produc forțe electromotoare proprii sub acțiunea radiațiilor incidente. Radiațiile eliberează electroni, însă aceștia pot fi utilizați ulterior numai cu participarea unei surse de tensiune continuă.

Cu totul altceva se observă în cazul efectului fotoelectric al stratului de blocare. Dacă se alcătuieste un circuit închis, format dintr-o celulă fotoelectrică generatoare și un galvanometru și apoi se va îndrepta un flux de lumină spre suprafața fotosensibilă a celulei, prin circuit va trece un curent electric. Producând, sub acțiunea radiațiilor, o forță electromotoare proprie, celulele fotoelectrice generatoare permit în felul acesta să se realizeze transformarea directă a energiei radiante în energie electrică. În consecință, ele reprezintă — în esență — niște centrale electrice miniatură, în care drept „combustibil” se folosește energia radiantă absorbită. În aceasta constă deosebirea principală dintre celulele fotoelectrice semiconductoare și alte dispozitive fotoelectrice.

În principiu, orice celulă fotoelectrică generatoare reprezintă un sistem format dintr-o plăcuță-suport metalic, un strat subțire de semiconductor și un electrod metalic superior, semitransparent. Tehnologia confecționării celulei fotoelectrice este alcătuită în așa fel, încât se obține un strat semiconductor neuniform în ce privește proprietățile lui electrice. O parte a lui, care vine în contact direct cu electrodul interior (baza), capătă un anumit tip de conducție, de exemplu prin goluri, iar cealaltă parte — care aderă la electrodul superior (adică la stratul de metal subțire, semitransparent) — dobândește un tip de conducție opus (electronic). Între aceste

straturi se găsește stratul de baraj. Va să zică, celula fotoelectrică generatoare, sau cum mai este numită „celula fotoelectrică cu strat de blocare”, constituie un sistem compus dintr-un electrod metalic inferior, un semiconductor cu două regiuni, una cu goluri și alta cu electroni, stratul de baraj cuprins între ele și un electrod semitransparent superior (fig. 32).

Întreg acest sistem este introdus într-o montură de masă plastică, prevăzută cu o fereastră și două borne, la care se

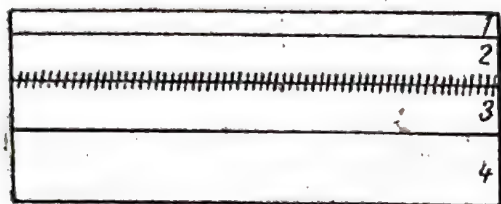


Fig. 32. Structura schematică a unei celule fotoelectrice cu strat de blocare (generatoare);

1 — electrod semitransparent superior, 2 — semiconductor electronic, 3 — semiconductor cu goluri, 4 — electrod metalic inferior. Domeniul hașurat reprezintă stratul de blocare

leagă conductoarele de la electrodul inferior și cel superior al celulei fotoelectrice (fig. 33).

Când pe electrodul superior al celulei fotoelectrice cade un flux de lumină, o parte din acesta este reflectat de stratul metalic, o altă parte este absorbită în grosimea acestui strat și, în fine, partea care rămâne trece prin strat și este absorbită de regiunea semiconductorului. Aceasta duce la eli-

berarea de electroni și goluri, proces despre care s-a vorbit amănunțit în capitolul I al acestei cărți. Ca rezultat al deplasării golurilor spre un electrod și a electronilor spre celălalt, electrozii se încarcă cu electricitate de semne opuse și între ei apare o diferență de potențial a cărei valoare, pînă la o anumită limită, va fi cu atît mai mare, cu cît intensitatea fluxului luminos este mai mare. Dacă între bornele celulei fotoelectrice se leagă un conductor oarecare, formîndu-se astfel un circuit închis, prin acesta va circula un curent atîta timp cît celula fotoelectrică primește fluxul de lumină.

Pentru fiecare celulă fotoelectrică au o importanță esențială factori ca stabilitatea proprietăților fotoelectrice în timp, caracteristicile de frecvență și de lumină, sensibilitatea integrală și cea spectrală. Sensibilitatea integrală a unei celule fotoelectrice este o mărime fizică importantă. Ea caracteri-

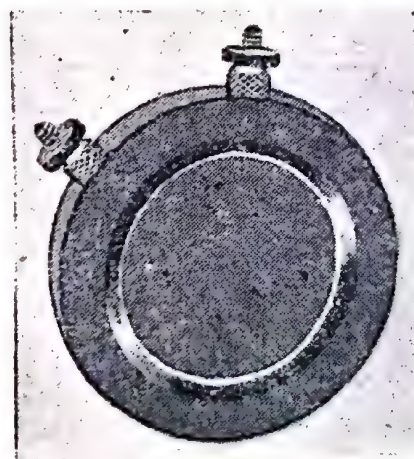


Fig. 33. Aspectul exterior al unei celule fotoelectrice generatoare tipice

zează capacitatea de transformare a celulei și este numeric egală cu intensitatea fotocurentului care apare în circuitul închis al celulei fotoelectrice, atunci când pe aceasta cade un flux de lumină egal cu unitatea. În mod obișnuit, pentru partea vizibilă a spectrului, sensibilitatea integrală se măsoară în microamperi pe lumen. Sensibilitatea spectrală a celulei fotoelectrice caracterizează intensitatea fotocurentului care apare sub acțiunea luminii de o lungime de undă strict determinată. Deoarece orice celulă fotoelectrică „simte”, de regulă, o porțiune relativ largă a spectrului, caracteristica spectrală a fiecărei celule fotoelectrice este reprezentată sub forma unui grafic. Dacă pe axa ordonatelor se notează sensibilitatea, iar pe axa absciselor — lungimea de undă, caracteristica spectrală a celulei fotoelectrice va fi reprezentată printr-o linie curbă (fig. 34).

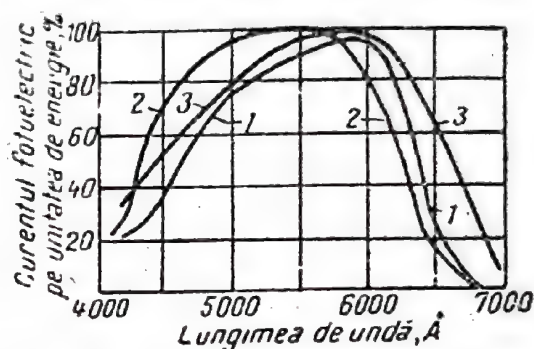


Fig. 34. Caracteristicile spectrale ale unei celule fotoelectrice de seleniu. Curbele 1, 2 și 3 se referă la seleniu cu diferite adaosuri

Cea dintâi celulă fotoelectrică generatoare (celulă foto-voltaică) a fost făcută din oxid cupros. Curînd, însă ea a încetat de a mai fi folosită, deoarece au fost create celule fotoelectrice generatoare mult mai perfecționate, la început din seleniu, apoi din sulfură de taliu, sulfură de argint și germaniu. Dar chiar și aceste minunate celule fotoelectrice, cu toate proprietățile lor remarcabile, n-au putut pretinde rolul de transformator — avantajos din punct de vedere economic — al energiei solare în energie electrică. La drept vorbind, inventatorii lor nici măcar nu și-au propus un asemenea scop, ci au rezervat celulelor fotoelectrice generatoare un rol cu totul diferit — acela de indicator sensibil la lumină. Îndeplinind aceste funcțiuni, ele au căpătat o răspîndire foarte largă. În timpurile noastre, celula fotoelectrică a devenit unul dintre dispozitivele cele mai răspîndite, mai importante și totodată de neînlocuit. Datorită introducerii ei pe scară largă în tehnică, a devenit posibil cinematograful sonor, a devenit nepericuloasă munca lucrătorilor, s-au automatizat multe procese de producție, a devenit o realitate transmiterea la mari distanțe a imaginilor și telegramelor, s-a înlăptuit televiziunea, s-au extins considerabil posibilitățile vizuale ale

ochiului omenesc, capabil acum de a vedea în întuneric deplin cu ajutorul unor traductoare electrono-optice etc.

În multe operații importante de producție, celula fotoelectrică a înlocuit omul. În industria metalurgică ea comandă motoarele laminoarelor, controlează calitatea pieselor turnate și participă la o serie întreagă de alte cicluri tehnologice. Cu ajutorul celulelor fotoelectrice se realizează controlul sigur al unui mare număr de operații de producție. Celulele fotoelectrice îndeplinesc nenumărate funcțiuni: sortează toate felurile posibile de piese, rebutează produsele care nu sînt de calitate bună, reglează mișcarea mijloacelor de transport, asigură arderea corectă a combustibilului, reglează temperatura cuptoarelor, conectează automat iluminatul străzilor și aprind luminile geamandurilor, înlocuiesc portarii, păzesc neobosite și cu vigilență, cheamă infirmiera la un bolnav grav, semnalizează începutul unui incendiu, evită accidentele în transportul feroviar etc.

Introducerea în economia națională sovietică a diferitelor instalații fotoelectrice perfecționează tehnica sovietică și o ridică la un nivel mai înalt.

Tot atît de mult se folosesc celulele fotoelectrice și în practica științifică. Folosirea aparatelor și circuitelor fotoelectrice în laborator se dovedește excepțional de eficace. Cele mai importante probleme metodice, înainte dificil de rezolvat, capătă — cu ajutorul instalațiilor fotoelectrice — o soluție rapidă și simplă. Multe probleme științifice se dovedesc rezolvabile sau capătă un impuls pentru dezvoltarea ulterioară datorită utilizării metodelor de cercetare fotoelectrică. Există ramuri întregi ale științei, în care celulele fotoelectrice s-au dovedit un instrument de neînlocuit pentru studiul noilor fenomene din natură. Folosirea fotometrelor cu celule fotoelectrice, a multiplicatoarelor electronice care se bazează pe principiul amplificării fotocurentului datorită emisie secundare de electroni, a contoarelor de fotoni și a altor dispozitive fotoelectrice sensibile, a permis ca în ultimii ani să se obțină noi date despre procesele nucleare, despre luminescența straturilor superioare ale atmosferei, despre dispersia luminii de către molecule, despre structura galaxiei și o serie întreagă de alte probleme.

Introducerea pe scară largă a metodelor fotoelectrice în cercetările științifice și în producție, în tehnica transporturilor, a telecomunicațiilor și a construcțiilor, folosirea celulelor fotoelectrice în cinematografie și televiziune a dus la in-

tensificarea lucrărilor științifice în domeniul fotoelectronicii. Succesele ei, condiționate pe de o parte de dezvoltarea vertiginosă a tehnicii și de noile cerințe care apar în cursul acestui proces, iar pe de altă parte, de către dezvoltarea și aprofundarea cunoștințelor științifice, au dus la o folosire pe scară neobișnuit de largă a celulelor fotoelectrice.

În toate circuitele fotoelectrice se folosesc două proprietăți ale celulei fotoelectrice: variația fotocurentului în funcție de intensitatea fluxului luminos și, în general, apariția curentului datorită acțiunii luminii. Dispozitivele fotoelectrice permit să se realizeze: conectarea aparatelor, automatelor, mașinilor, reglarea desfășurării unor diferite procese, măsurarea unor diverse mărimi fizice, înregistrarea unor anumite fenomene, redarea sunetelor, transmiterea imaginilor etc.

În funcție de destinație, în circuitul cu celulă fotoelectrică se introduce sau un galvanometru, sau un releu electromagnetic, sau orice alt aparat. Pentru multe scopuri practice, dispozitivul fotoelectric conține, în afară de celula fotoelectrică, și un releu electromagnetic. Un asemenea dispozitiv, uneori în combinație cu un amplificator de fotocurenți, se numește releu fotoelectric. În principiu, el funcționează în modul următor: când celula fotoelectrică este iluminată, în circuitul ei apare un curent care provoacă anclanșarea releului electromagnetic. Acesta din urmă este întotdeauna legat de un circuit oarecare, ce trebuie închis sau deschis. Acest circuit servește la pornirea sau, dimpotrivă, la oprirea unui aparat oarecare. Simplitatea construcției releelor fotoelectrice cu semiconductori și siguranța lor de funcționare permit ca ele să aibă numeroase aplicații în cele mai diverse domenii.

Celulele fotoelectrice sînt mult utilizate pentru evitarea accidentelor. Un loc periculos, de exemplu spațiul de lucru al unei prese mecanice, este traversat de o rază luminoasă care ajunge la un releu fotoelectric așezat lateral. Atîta timp cît celula fotoelectrică este iluminată, prin circuitul releului fotoelectric trece continuu un curent și armătura este atrasă miezul de fier al releului electromagnetic. Când iluminarea se întrerupe, curentul încetează de a mai circula, armătura se desprinde de miezul de fier și închide un circuit exterior, care pune în funcțiune o instalație de frînare ce oprește presa extrem de repede.

Dispozitivele fotoelectrice care protejează muncitorul împotriva accidentelor și care au căpătat deja o largă răspîndire se bazează pe diferite soluții constructive determinate de

operația tehnologică concretă căreia îi sînt destinate aceste dispozitive. Se ține seama nu numai de particularitățile mașinilor cu care trebuie să aibă de-a face muncitorul, dar și de particularitățile mișcărilor muncitorului însuși. În unele cazuri este expusă pericolului mîna muncitorului, în altele întregul braț și chiar umărul, iar în altele — corpul muncitorului. În fiecare caz concret de acest fel, automatica fotoelectrică protejează muncitorul împotriva accidentelor.

Cu același succes se folosește automatica fotoelectrică pentru protecția oamenilor care lucrează la tensiuni înalte. Există multe instalații de acest fel: fiecare dintre ele rezolvă problema blocării ținînd seamă de specificul respectiv și se bazează pe principiul întreruperii unei raze de lumină.

În fabrici și uzine, unde se confecționează piese standard în mare cantitate, apare necesitatea de a se ține evidența numărului lor. Există cazuri în care numărarea pieselor nu poate fi efectuată cu contoare mecanice cu contacte. Aceasta se referă, de exemplu, la toate piesele metalice incandescente, care tocmai au trecut printr-o operație de ștanțare sau laminare. Contorul fotoelectric automat modern numără cu aceeași precizie orice obiecte: și mari și mici și reci și calde. În afară de aceasta, numărarea pe cale fotoelectrică a produselor poate fi combinată cu sortarea lor. Principiul construcției unui asemenea dispozitiv este foarte simplu. De o parte a unei benzi transportoare se amplasează o lampă cu lentilă, iar de cealaltă — un releu fotoelectric. Fasciculul luminos îngust este întrerupt de piesele care se deplasează pe transportor. Releul fotoelectric pune în funcțiune un contor electric cu funcționare rapidă și acesta numără piesele ce se deplasează. Prin acest procedeu se numără, în unele fabrici, porțiile de înghețată, bucățile de săpun, cutiile de chibrituri etc.

În multe uzine, cîntarele sînt folosite nu numai pentru cîntărirea pieselor finite, dar și pentru scopuri de control. Astfel, de exemplu, în funcție de greutate se pot rebuta piesele care nu se încadrează în toleranțe. Cîntarele pot servi și la sortarea produselor care se deosebesc unul de altul numai prin greutatea lor. Pentru accelerarea procesului de rebutare, sortare sau cîntărire, este rațional ca în unele cazuri să se folosească circuite fotoelectrice. Firește, există multe asemenea circuite și tot atît de multe pot fi imaginate și de acum încolo. Ca exemplu vom considera unul dintre aceste circuite, care servește la cîntărirea cimentului într-o fabrică de ciment.

Raza de lumină este îndreptată în așa fel spre fotoreleu, încît atunci cînd se ajunge la echilibru, pîrghia cîntarului se pune în mișcare și întrerupe fasciculul luminos. Releul fotoelectric anclanșează și pune în funcțiune un mecanism care întrerupe turnarea cimentului pe platan.

Alte circuite de cîntărire automată sînt alcătuite conform aceluiași principiu — întreruperea fasciculului luminos de către o parte mobilă oarecare a cîntarului: pîrghia, platanul, acul indicator etc. În principiu, se poate realiza un circuit fotoelectric care să dea posibilitatea efectuării cîntăririi cu un mare grad de precizie. Este convenabil și faptul că pentru cîntărirea automată folosind relele fotoelectrice nu este necesar contactul direct al aparatului de reglare cu cîntarul însuși. În plus, celula fotoelectrică permite să se realizeze controlul și orice operație automată de la un punct îndepărtat, legat de locul de producție numai prin fire.

Acum cîțiva ani, chiar și cele mai puternice laminoare funcționau fără automată fotoelectrică. Celula fotoelectrică, folosită în multe ramuri ale industriei, a început să-și găsească aplicații și în industria metalurgică, în special la fabricarea laminatelor metalice. Cu ajutorul unui releu fotoelectric, valțurile laminorului încep să se rotească în sens invers în momentul necesar. Un sistem automat de acest fel are o construcție principial simplă. De o parte a valțurilor se găsește sursa de lumină care trimite un fascicul luminos aproape paralel, iar de cealaltă — releul fotoelectric. Cînd piesa care urmează a fi laminată, o grindă, o șină sau oricare altă piesă, intersectează fasciculul luminos, releul fotoelectric anclanșează și conectează mecanismul care provoacă rotirea în sens invers a valțurilor.

Pentru verificarea de control a calității produselor se folosesc adesea aparate fotoelectrice speciale, construite în așa fel încît să permită determinarea stării unei piese ținînd seama de un parametru oarecare al ei: duritatea, culoarea, dimensiunile etc. Iată cum, de exemplu, se rebutează cu ajutorul unei celule fotoelectrice — în funcție de duritate — bolțurile pistoanelor pentru motoarele cu ardere internă. Cînd bolțul se deplasează pe banda transportorului, pe el cade un ciocănaș care în urma ciocnirii sare în sus. Dacă bolțul corespunde normei în ce privește duritatea, ciocănașul sare pînă la o anumită înălțime și intersectează raza de lumină a releului fotoelectric. Întreruperea razei de lumină provoacă anclanșarea rapidă a unui releu ce pune în funcțiune un

mecanism care împinge bolțul mai departe pe banda transportoare. Dacă duritatea bolțului este mai mică decât cea prescrisă, ciocănașul — după ciocnire — nu sare atât de mult încît să ajungă pînă la raza de lumină. În acest caz nu are loc întreruperea razei și anclanșarea releului și, cu ajutorul unui dispozitiv special, bolțul rebutat va fi aruncat într-o cutie. Un asemenea automat sortează pînă la 2 000 bolțuri pe oră.

Adesea, în tipografii au loc întreruperi forțate ale unei mașini rotative. Aceasta se întîmplă deoarece banda de hîrtie care iese din mașină se rupe. Ruperea benzii duce, în primul rînd, la rebuturi, iar în al doilea rînd, constituie cauza opririi întregului agregat. Pentru evitarea opririi de lungă durată a mașinii, se folosește un dispozitiv fotoelectric. Schema acestui dispozitiv este următoarea. La ambele margini ale benzii care se deplasează se montează relee fotoelectrice. Sub ele, adică de partea cealaltă a benzii, se așază sursele de lumină. De îndată ce începe ruperea benzii de hîrtie, și această rupere, de regulă, începe de obicei de la margine, releul fotoelectric anclanșează și mașina se oprește. Un asemenea automat de oprire, cu fotorezistențe $\Phi C-K1$ și $\Phi C-K2$ a fost construit de un grup de ingineri și tehnicieni de la tipografia „Peceatnîi Dvor” din Leningrad, și este folosit cu succes acolo.

Cu ajutorul unei instalații fotoelectrice se realizează verificarea tablelor metalice, pentru a se descoperi dacă în ele există orificii și fisuri mici. Pe o parte a tablei se deplasează fasciculul de lumină, iar pe cealaltă parte — sincron cu raza — se deplasează o celulă fotoelectrică. Raza împreună cu celula fotoelectrică explorează întreaga suprafață a tablei. Cînd se întîlnește un orificiu sau o fisură, se conectează o instalație de semnalizare și, simultan, deplasarea razei și a celulei fotoelectrice se întrerupe.

Există mai multe procedee care dau posibilitatea să se mențină automat, cu un mare grad de precizie, un nivel constant al lichidului dintr-un rezervor, folosind în acest scop un releu fotoelectric. O instalație de acest fel este realizată în modul următor. Pe doi pereți opuși ai rezervorului, la înălțimea nivelului la care trebuie să se găsească lichidul, se fac două ferestruici mici de sticlă. Printr-o ferestruică se trimite un fascicul de lumină, iar în dreptul celei de-a doua ferestruici se montează o celulă fotoelectrică conectată la circuitul amplificator al releului fotoelectric. Pe suprafața lichidului

dului din rezervor se găsește un plutitor. Cu ajutorul unui dispozitiv simplu, plutitorul se menține întotdeauna la mijlocul suprafeței lichidului. Pe măsură ce se consumă lichid, plutitorul coboară din ce în ce mai jos. În fine, plutitorul se va coborî pînă la nivelul fluxului de lumină, care merge de la o fereastră la alta, ceea ce provoacă anclanșarea releului fotoelectric. Acesta pune în funcțiune un mecanism ce deschide robinetul prin care rezervorul va fi din nou umplut cu lichid. Creșterea nivelului lichidului peste marginea superioară a fluxului luminos închide automat robinetul. Întreg acest sistem poate fi reglat foarte precis. Evident, cu cît lățimea fluxului luminos este mai mică, cu atît se reglează mai precis înălțimea dată a nivelului lichidului. O instalație analogă se folosește și pentru controlul și semnalizarea înălțimii nivelului de umplere a vanelor, buncărelor, lăzilor cu materiale friabile etc. În acest caz nu este necesar un plutitor. Raza de lumină este întreruptă de însăși masa substanței friabile: nisip, cărbune, grîne, făină etc.

Adesea, releele fotoelectrice se folosesc pentru deschiderea automată a ușilor. Raza de lumină care pleacă de la o lampă așezată în fața ușilor este întreruptă de persoana care intră. Releul fotoelectric anclanșează și închide un circuit electric ce pune în mișcare un motor care deschide repede ușa.

Exemplele date, referitoare la aplicațiile celulelor fotoelectrice, ilustrează principiul funcționării lor, bazat pe faptul că fasciculul luminos este întrerupt — la momentul necesar — dintr-o cauză oarecare. Vom da acum cîteva exemple de funcționare a circuitelor fotoelectrice bazate pe utilizarea variației curentului fotoelectric în funcție de intensitatea luminii incidente la celula fotoelectrică.

Adesea apare necesitatea de a se determina transparența unei substanțe în stare lichidă, gazoasă și chiar solidă. În acest scop se folosește un aparat special, care măsoară gradul de opalescență (nefelometrul). Principiul de funcționare al nefelometrului cu obiectiv și celulă fotoelectrică este extrem de simplu. Razele emise de o sursă de lumină trec printr-o lentilă și prin vasul care conține substanța ce urmează a fi încercată, apoi fluxul de lumină paralel ajunge la o celulă fotoelectrică conectată într-un circuit. După ce se măsoară valoarea curentului fotoelectric, se dă vasul la o parte și atunci fasciculul luminos cade direct pe celula fotoelectrică, producînd un curent mai intens. Raportul fotocurenților dă

tocmai valoarea transparenței, exprimată în unități relative. Este necesar numai să se introducă o corecție pentru acea parte din cantitatea de lumină, care este reflectată la trecerea dintr-un mediu în altul, din aer în soluție și invers, și să se țină seamă de absorbția în vasul însuși.

Celulele fotoelectrice sînt folosite tot atît de mult și în domeniul fotometriei. Variația direct proporțională a fotocurentului în funcție de intensitatea luminii incidente, care se observă la unele celule fotoelectrice, face ca ele să fie excepțional de prețioase pentru acest scop. Încă de mult, în locul fotometrelor obișnuite au început să se folosească dispozitive fotoelectrice. Cu ajutorul lor se determină intensitatea luminii diferitelor surse și se apreciază foarte precis iluminarea dată de lumina zilei.

Pentru măsurarea iluminării în funcție de timpul zilei și de condițiile meteorologice s-au creat diferite tipuri de fotometre înregistratoare obiective, cu celule fotoelectrice. Cele mai bune aparate sînt construite în așa fel, încît pe un cilindru rotitor — pe care se fixează o hîrtie — se trasează automat curba variației iluminării în funcție de timp. Adesea, în locul unei fîi albe de hîrtie liniată, pe cilindru se fixează hîrtie fotosensibilă și pata luminoasă trimisă de oglinda galvanometrului „desenează” pe ea o curbă.

Trebuie să se țină seama că pentru fotometrarea luminii zilei este necesar să se folosească celule fotoelectrice a căror sensibilitate spectrală coincide cu curba de sensibilitate a ochiului.

Prin intermediul celulelor fotoelectrice se fotometrează nu numai stele de prima mărime, dar și stelele de mărimea a șasea. Celulele fotoelectrice sensibile la radiațiile ultraviolete ale spectrului sînt folosite pentru fotometrarea surselor de radiații ultraviolete.

În fizioterapie, drept mijloc terapeutic se folosește adesea iradierea cu raze ultraviolete a organului bolnav. Aici are un rol esențial dozarea radiațiilor; o intensitate prea mare este periculoasă. Cu ajutorul unei celule fotoelectrice se poate regla extrem de precis doza de radiații ultraviolete.

Fotografii folosesc deseori un exponometru. Exponometrul este un aparat format dintr-o celulă fotoelectrică și un milivoltmetru sensibil cu ac indicator, montate într-o cutie comună. În timpul expunerii, suprafața celulei fotoelectrice este îndreptată spre obiectul ce urmează a fi fotografiat. Cu cît este mai mare cantitatea de lumină care cade pe celula foto-

electrică, cu atît acul galvanometrului va devia mai mult din poziția de zero.

În funcție de ora zilei, de starea norilor și de alte condiții, iluminarea obiectului va varia, devenind cînd mai mare, cînd mai mică. În conformitate cu variațiile iluminării se vor schimba și indicațiile milivoltmetrului exponometrului. Acesta din urmă va indica chiar și variații neînsemnate ale iluminării și acul galvanometrului se va opri în dreptul cifrei de pe scală care indică precis timpul expunerii.

Pe rîurile navigabile, pentru notarea liniei de navigabilitate pe toată lungimea, la distanțe egale se așază geamanduri. Pe virful acestora se montează sau un felinar cu petrol, sau o lampă electrică. În timpul zilei, vasele care trec observă destul de bine geamandurile, fiindcă acestea ies la suprafața apei. O dată cu căderea întunericului, trebuie să se aprindă felinarele. De obicei, această operație este efectuată de un lucrător special — geamanduristul. Acesta, cel puțin de două ori în timp de 24 ore, merge cu barca la geamanduri, aprinde felinarele, iar după aceea — la ivirea zorilor — le stinge. Toată această muncă obositoare pentru om poate fi preluată de o celulă fotoelectrică. Pe geamanduri se instalează baterii uscate și relee fotoelectrice. Cînd cade întunericul, releele fotoelectrice conectează automat iluminatul electric. Lămpile ard atîta timp cît este întuneric. O dată cu ivirea zorilor, pentru un anumit grad de iluminare, releul fotoelectric deconectează lampa.

De o mare răspîndire se bucură metoda de analiză care a căpătat denumirea de titrare. Ea constă în faptul că unei soluții care are caracter acid i se adaugă treptat cantități mici dintr-o substanță bazică, amestecîndu-se continuu. Amestecarea durează pînă cînd cantitatea de substanță bazică adăugată este suficientă pentru a neutraliza soluția. Știind cîtă substanță bazică s-a turnat în soluția acidă, se poate stabili destul de precis cantitatea de acid care se găsește în soluție.

Punctul culminant este momentul cînd are loc neutralizarea completă; el nu trebuie trecut cu vederea. Cum să se stabilească dacă neutralizarea a avut loc sau nu? În acest scop se recurge la ajutorul unui indicator, de exemplu hîrtie de turnesol sau soluții de turnesol și fenoltaleină. Dacă există acid, soluția de turnesol se va colora în roșu, iar dacă există o bază — în albastru. Cînd soluția este neutralizată, ea capătă o nuanță violacee caracteristică.

Iată cum această proprietate — variația culorii indicatorului — dă posibilitatea să se determine, cu ajutorul unei celule fotoelectrice, momentul când are loc neutralizarea completă.

În vasul în care se găsește soluția studiată, se toarnă o cantitate mică de soluție de turnesol. În acest caz soluția se va colora în albastru sau în roșu, după cum ea conține o bază sau un acid. Se aprinde apoi o lampă cu incandescență, a cărei lumină, după trecerea printr-un filtru optic, traversează soluția și ajunge la celula fotoelectrică. Dintr-o biuretă începe să se picure sau un acid, sau o bază. În momentul când soluția se va decolora, curentul care trece prin celula fotoelectrică se mărește brusc și pune în funcțiune un releu electromagnetic, care închide robinetul biuretei.

Pentru titrarea fotoelectrică are o importanță esențială alegerea rațională a fitrelor optice. Aici este important ca în momentul când survine decolorarea să aibă loc o variație bruscă a intensității fotocurentului.

Deosebit de important este rolul celulei fotoelectrice în cinematograful sonor, unde ea îndeplinește o funcțiune importantă: transformă lumina într-un curent electric, iar acesta din urmă — prin intermediul unor instalații speciale — permite redarea sunetelor.

Există mai multe procedee de înregistrare a sunetului pe o peliculă cinematografică. Nu vom analiza amănunțit întreaga tehnică a înregistrării sonore. Vom menționa numai că pe o parte a peliculei, împreună cu cadrele filmului, se deplasează continuu „pista sonoră” (fig. 35).

Muzica sau vorbirea înregistrată pe peliculă este recepționată la început de un microfon. Prin intermediul microfonului, vibrațiile sonore produc variații ale intensității unui curent electric. După ce este amplificat de mai multe ori, curentul face să varieze intensitatea unui izvor de lumină, exact în ritmul vibrațiilor sonore. Dacă se dirijează acest flux luminos de intensitate variabilă spre marginea unei pelicule cinematografice care se deplasează cu o viteză oarecare, acoperită cu o emulsie fotosensibilă, pe aceasta se va obține — după revelare — o fișie foarte îngustă cu grad de înnegrire diferit. Această așa-numită „pistă sonoră” va consta din linii transversale de transparență diferită. Lățimea și gradul de transparență al liniilor vor depinde de frecvență și de intensitatea variațiilor luminoase, cu alte cuvinte de frecvența și de intensitatea vibrațiilor sonore.

Celula fotoelectrică nu a luat de loc parte la înregistrarea sunetului pe peliculă. Procesul invers, redarea sunetului, nu poate fi însă realizat fără o celulă fotoelectrică.

Să examinăm principiul care stă la baza acestui proces.

Un fascicul luminos îngust, care pleacă de la o lampă electrică ce arde strălucitor, este proiectat pe pista sonoră a peliculei cinematografice. Trecând prin peliculă, raza luminoasă ajunge la o celulă fotoelectrică. În timpul deplasării

peliculei iluminarea celei fotoelectrice va varia exact la fel cum variază înnegrirea peliculei cinematografice la înregistrarea sunetului. Celula fotoelectrică va debita un curent care variază la fel ca intensitatea luminii sub influența vibrațiilor sonore. Acest curent este apoi amplificat și aplicat unui difuzor care va reda vibrațiile sonore înregistrate pe peliculă.

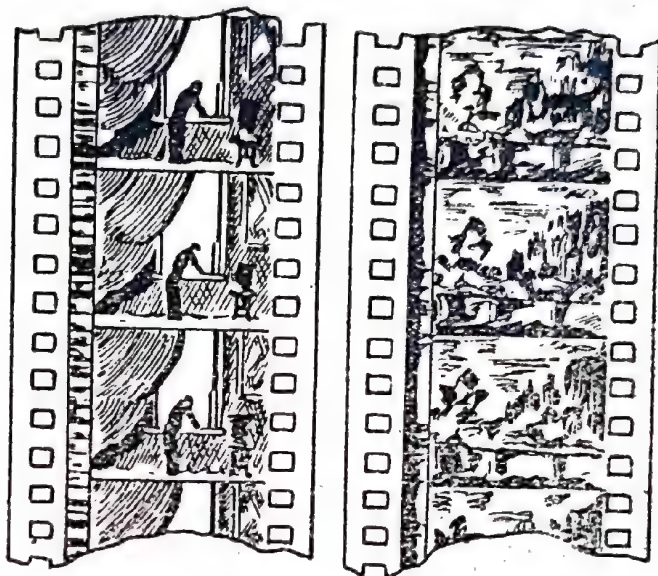


Fig. 35. Diferite tipuri de piste sonore

Firește, cititorul înțelege că exemplele date nu epuizează nici pe departe aplicațiile celulelor fotoelectrice în practică. Începând din 1954 ele au început să prezinte interes nu numai ca indicatoare sensibile la lumină, dar și ca convertizoare de energie solară direct în energie electrică, avantajoase din punct de vedere economic. În anul 1958 a fost construită o nouă celulă fotoelectrică semiconductoare, din siliciu, cu randament foarte înalt, care la lumină solară directă atinge 10%.

Siliciul este un element care posedă proprietăți semiconductoare. El face parte din grupa a IV-a a sistemului periodic și este al doilea element, ca răspîndire, din natură. Greutatea lui atomică este de 28,06, iar numărul de ordine este 14. Temperatura de topire a siliciului cristalin este de 1415°C , iar temperatura de topire este de 2360°C . Conductivitatea electrică a siliciului, în funcție de felul și numărul de adaosuri introduse în el, variază între limite destul de largi: de la

$7 \cdot 10^2$ pînă la $10^{-1} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. Ultima cifră corespunde conductivității siliciului pur.

În decurs de relativ mulți ani, siliciul a constituit obiectul unor cercetări fizice multilaterale. În ultima vreme, fizicienii și-au îndreptat atenția în special asupra proprietăților lui electrice. Ca rezultat al unor lucrări de cercetare de mai mulți ani, au fost obținute numeroase rezultate care prezintă o mare importanță atât pentru teorie, cît și pentru practică. Dintre aceste rezultate trebuie menționată în mod special metoda obținerii siliciului cu tipul de conducție stabilit în prealabil — electronic sau prin goluri, care permite să se realizeze detectoare cu siliciu. Un rezultat la fel de esențial, fără îndoială, trebuie considerat elaborarea tehnologiei introducerii în monocristalul de siliciu a unor adaosuri de atomi străini, care permit să se obțină într-un singur cristal o joncțiunea $p-n$, pe baza căreia a fost creată celula fotoelectrică de siliciu cu strat de blocare.

Tehnologia fabricării celulei fotoelectrice de siliciu este destul de complicată. Ea se reduce, în esență, la următoarele operații. La început, din siliciul topit „se cresc” monocristale mari. Creșterea cristalelor poate fi înfăptuită în diferite moduri. Unul dintre acestea constă în cufundarea, în siliciul topit, a unui „grăunte” care, după aceea, este tras foarte lent în sus. „Grăuntele”, adică un monocristal mic din substanța respectivă, constituie un centru de cristalizare în jurul căruia începe cristalizarea. În timpul ridicării lente a „grăuntelui” începe formarea treptată a monocristalului de siliciu, ale cărui dimensiuni pot fi suficient de mari. Întreg acest proces se efectuează în condiții de vid înaintat.

Monocristalele de siliciu obținute se taie în plăcuțe subțiri, de formă dreptunghiulară, circulară sau oricare altă formă. Plăcuța posedă mecanism de conducție electronic. Pentru crearea unei celule fotoelectrice cu strat de blocare, este însă necesar un sistem format din două semiconductoare cu tipuri de conducție diferite. În acest scop, una dintre suprafețele plăcuței este acoperită cu un strat uniform subțire de bor și se încălzește cîtva timp plăcuța într-un cuptor electric, cu pompele de vidare funcționînd continuu. Timpul de încălzire se alege în așa fel, încît atomii de bor să reușească — în decursul acestei perioade — să difuzeze în interiorul plăcuței numai pînă la o anumită adîncime. Deoarece adăugarea boru-

lui la siliciu îi comunică acestuia din urmă o conducție prin goluri, ca rezultat, o parte din plăcuța de siliciu va prezenta conducție prin goluri, iar cea de a doua parte — o conducție electronică. La limita de separație dintre cele două părți se formează o joncțiune $p-n$ și, ca urmare, stratul de blocare. Pe ambele suprafețe ale plăcuței de siliciu se depun — printr-o metodă specială — electrozi metalici, dintre care unul

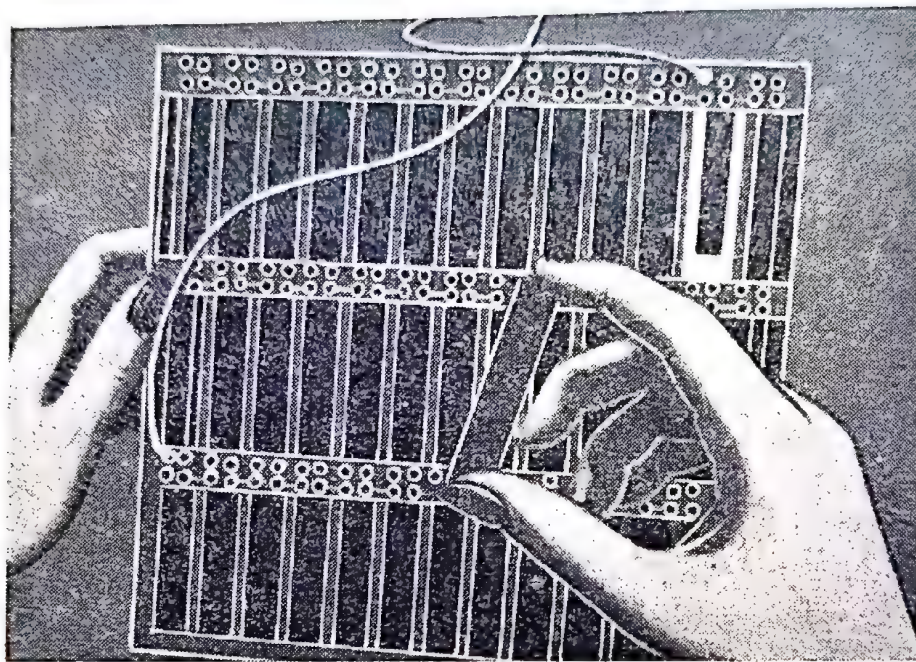


Fig. 36. Unul dintre primele modele de baterie solară

este semitransparent. După aceea se introduce plăcuța într-o montură cu două borne.

Deși au realizat un dispozitiv atât de remarcabil, cum este celula fotoelectrică de siliciu, totuși fizicienii nu au reușit încă să fabrice celule cu suprafață mare. De aceea, în prezent se leagă în serie mai multe celule fotoelectrice, formînd în felul acesta o baterie care a căpătat pe merit denumirea de „baterie solară”; un model de asemenea baterie este arătat în fig. 36.

La nivelul actual al tehnicii semiconductoarelor, celulele fotoelectrice de siliciu permit să se obțină, într-o zi cu soare, pînă la 100 W de energie electrică de la fiecare metru pătrat de suprafață fotosensibilă, adică cu un randament de circa 10%.

Dar ce înseamnă acest procentaj de 10%? Vom da câteva cifre comparative. Izvorul întregii vieți este soarele. Absorbînd energia razelor solare, un mic arbust crește și se transformă într-un arbore puternic. Botaniștii au calculat foarte precis că, arzînd lemn, obținem o cantitate de energie cel puțin de 100 ori mai mică decît aceea pe care arborele o primește de la soare în timpul creșterii lui. Aceasta înseamnă că, în lumea plantelor, randamentul de utilizare a energiei solare este sub 1%. Un randament încă și mai mic de utilizare a energiei solare au motoarele eoliene și chiar și cele mai moderne instalații hidrotehnice.

Vom da încă un exemplu, din alt domeniu, și anume din acela al transformărilor energetice obișnuite. Locomotiva are un randament de numai circa 8%, și doar locomotiva este o construcție complicată și voluminoasă cu un mare număr de



Fig. 37. Receptor de radiodifuziune alimentat prin intermediul a 7 celule fotoelectrice cu siliciu

pieșe în mișcare, în timp ce o celulă fotoelectrică este asemănătoare mai curînd cu o jucărie decît cu un dispozitiv energetic important. În plus, spre deosebire de alte transformatoare de energie, durata de serviciu a celulelor fotoelectrice semiconductoare poate fi extrem de îndelungată, iar în unele cazuri — practic infinită.

Aceste exemple sînt absolut suficiente pentru a ne forma o imagine clară despre posibilitățile celulei fotoelectrice cu siliciu de a transforma energia solară în energie electrică.

Bateria solară constituie un instrument remarcabil pentru raioanele neelectrificate. Acolo ea poate fi folosită la încărcarea acumulatorilor, alimentarea radioreceptoarelor și radioemitoarelor de dimensiuni mici, a centra-

lelor telefonice și în alte scopuri. În fig. 37 este arătat aspectul exterior al unui radioreceptor cu 8 tranzistoare de germaniu, alimentat de 7 celule fotoelectrice de siliciu, construite sub formă de discuri și instalate pe capacul superior al aparatului. Fotografia a înregistrat momentul cînd, în pauza dintre băi, o fată ascultă o emisiune de radio pe plajă.

În fig. 38 este arătat aspectul exterior al unui receptor cu 4 celule fotoelectrice de seleniu de formă dreptunghiulară. Acest tip de receptor nu are difuzor. În locul lui se folosește o casă telefonică (fig. 39).

Firma americană „Bell” a construit o baterie solară formată din 432 celule fotoelectrice de siliciu, avînd forma circu-

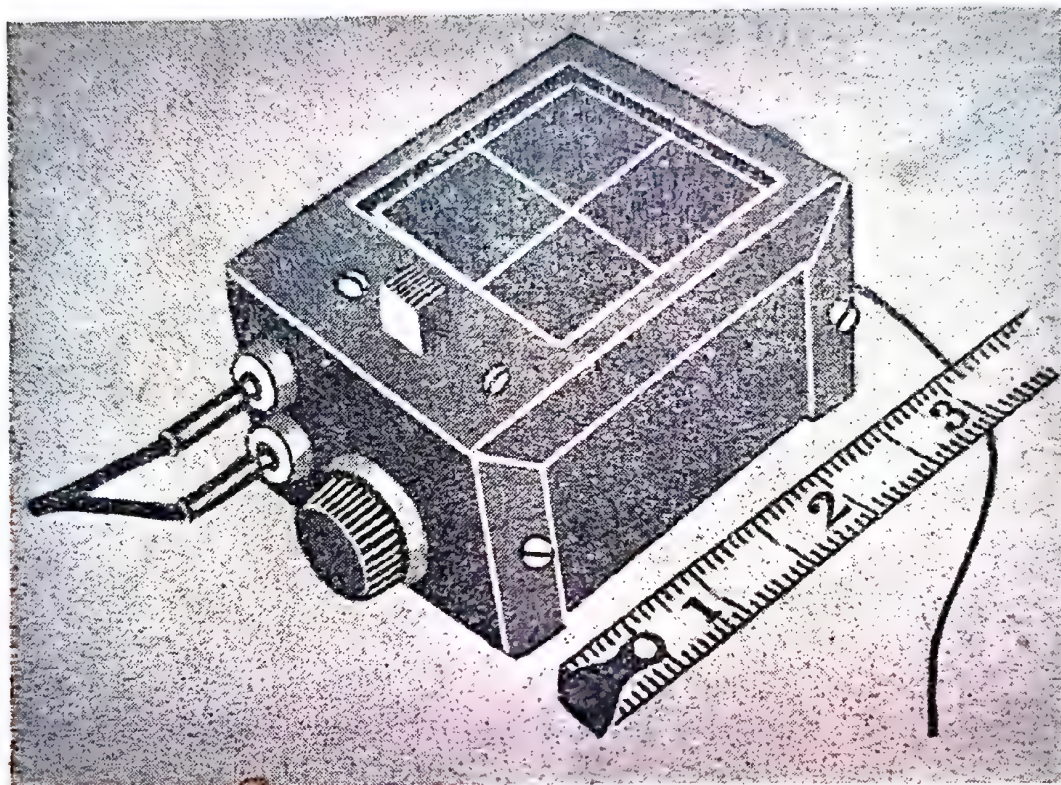


Fig. 38. Radioreceptor cu patru celule fotoelectrice cu seleniu. Lîngă receptor este așezată o riglă gradată în țo'i

lară. Aceste baterii se instalează pe stîlpii telefonici și servesc la alimentarea liniilor telefonice rurale (fig. 40). Bateria încarcă simultan și un acumulator și, la căderea întinericului, un releu special comută automat linia telefonică pentru alimentarea de la acest acumulator.

Inventatorii celulelor fotoelectrice cu siliciu au construit un radioemițător de dimensiuni mici, cu diode și tranzistoare cu germaniu. Acest emițător, arătat în fig. 41, necesită o putere neînsemnată, furnizată din plin de cîteva celule fotoelectrice de siliciu.



Fig. 39. Radioreceptor cu cască

O revistă științifică, analizând posibilitățile și perspectivele noilor celule fotoelectrice generatoare, scria în 1954 că o celulă fotoelectrică perfecționată, cu suprafața de $5,5 \text{ m}^2$, așezată pe acoperișul unei case, va putea furniza o energie electrică suficientă pentru satisfacerea, în timp de 24 ore, a tuturor cerințelor de energie necesare acestei case, pentru iluminat, încălzit, alimentarea frigiderului și a plitei electrice pentru pregătirea alimentelor.

Firește, există diferite feluri de case. Cu toate acestea, dacă o celulă fotoelectrică de dimensiunile amintite va putea într-adevăr să asigure iluminarea și încălzirea chiar și a

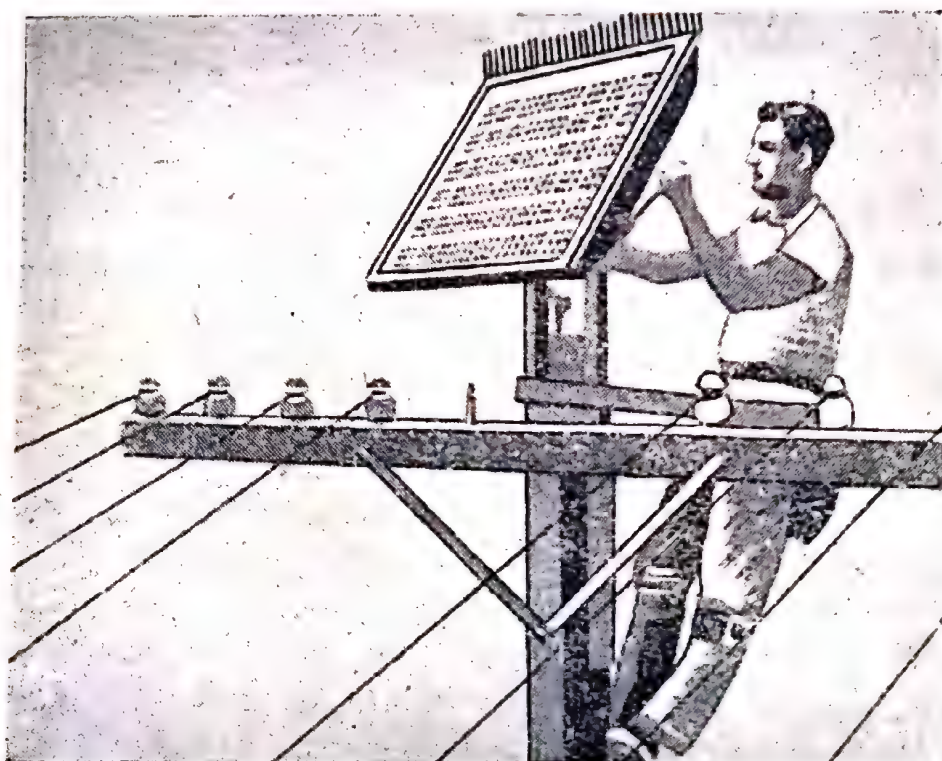


Fig. 40. Baterie solară alcătuită din 432 celule fotoelectrice cu siliciu

unei case foarte mici, pentru o singură familie, acest fapt va constitui prin sine însuși o cotitură importantă în știință. Acest eveniment nu a avut încă loc, dar nu există nici un fel de îndoială că el se va întâmpla foarte curînd.



Fig. 41. Radioemițător portativ alimentat de o baterie din celule fotoelectrice cu siliciu

10. BATERIA ATOMICĂ

Destul de recent, la sfîrșitul anului 1953, fizicienii au dobîndit încă o mare victorie, realizînd bateria atomică. Drept material pentru aceasta s-a folosit tot siliciul.

Bateria atomică este un dispozitiv cu semiconductor care creează energie electrică pe seama radiațiilor nucleare ale unui element oarecare. În cazul concret considerat de noi, acest element este stronțitul radioactiv.

Stronțitul este un element așezat în grupa a II-a a sistemului periodic al lui Mendeleev. Numărul lui de ordine este 38, iar greutatea atomică 87,63. Stronțitul nu este prea răspîndit în natură, ci constituie numai circa 0,008% din numărul total de atomi din scoarța pămîntească. În mod obișnuit, stronțitul este întîlnit nu sub forma de element liber, ci sub formă de compuși chimici, de exemplu sulfat sau carbonat de stronțiu.

Deoarece, la fel cu vecinii lui de grupă, calciul și bariul, stronțitul este extrem de activ, el se oxidează destul de repede

în prezența aerului, se combină cu multe elemente și, de asemenea, interacționează cu apa. Acest stronțiu „obișnuit” nu posedă nici un fel de proprietăți radioactive. La fel ca și multe alte elemente din sistemul periodic, stronțiul cu greutatea atomică 87,63 reprezintă în realitate un amestec de mai mulți izotopi de greutate atomică diferite. Reamintim că se numesc izotopi acele elemente chimice care posedă proprietăți chimice practic identice, dar se deosebesc unul de altul prin greutatea atomică. Aproape fiecare element al sistemului periodic are izotopii lui. De exemplu, magneziul, care se găsește în grupa a II-a a sistemului periodic și are greutatea atomică 24,32, este de fapt alcătuit din trei feluri de magneziu, adică din trei izotopi: unul dintre ei are greutatea atomică 23,99, al doilea — greutatea atomică 24,99, iar ultimul — greutatea atomică 25,99. Elementul nichel, din grupa a VIII-a, are cinci izotopi cu următoarele greutate atomică: 57,96; 59,95; 60,95; 61,95; 63,95. Greutatea atomică dată în tabelă a nichelului este 58,69. Mercurul are 7 izotopi, elementele radioactive, inclusiv — firește — și cele făcute radioactive în mod artificial, la care radioactivitatea apare după o prelucrare specială a nucleelor stabile.

Din numărul elementelor artificial radioactive face parte și stronțiul; acesta are 10 izotopi. Printre acești izotopi există unul cu greutatea 90, adică stronțiul-90, care constituie un reziduu la exploatarea unui reactor atomic. În timpul dezagregării lui radioactive, el emite radiații β , adică electroni. În acest caz este caracteristic și excepțional de important faptul că electronii emiși de stronțiul-90 posedă viteze considerabile și, în consecință, valori mari ale energiilor cinetice. În afară de aceasta, are o importanță esențială și durata de înjumătățire a stronțiului-90, egală cu 25 ani. În decursul acestui interval de timp destul de lung, numai jumătate din cantitatea inițială de stronțiu este supusă dezagregării radioactive.

Tocmai aceste proprietăți ale stronțiului-90 au făcut posibilă folosirea lui în bateria atomică, a cărei denumire este legată de faptul că sursa inițială de energie este aici de fapt un reactor atomic.

Cum este alcătuită această baterie?

Se confecționează o plăcuță mică dintr-un monocristal de siliciu, care este apoi pusă în contact cu un electrod metalic. Prin prelucrarea specială a unei părți a monocristalului se

creează siliciu electronic, iar în altă parte — siliciu cu goluri. Dacă privim plăcuța de siliciu care, să admitem, este așezată pe o masă, toate elementele ei se succed în următoarea ordine: siliciul cu goluri, siliciul electronic, electrodul metalic. Contactul dintre partea cu goluri a monocristalului și cea cu electroni duce la formarea stratului de blocare. Nu este dificil să se observe că construcția dispozitivului descris nu se deosebește în principiu prin nimic de construcția celulelor fotoelectrice generatoare și, în particular, de aceea a bateriei solare. Și aici și acolo există: un semiconductor electronic, care vine în contact cu un semiconductor cu goluri, un strat de blocare și un electrod metalic. Dar în construcția bateriei atomice mai există o particularitate ce deosebește bateria atomică de celula fotoelectrică generatoare. Această particularitate constă în faptul că pe suprafața liberă a monocristalului de siliciu se depune un strat subțire de stronțiu-90 radioactiv, iar deasupra acestui strat — un electrod. Stronțiul emite electroni de mari energii. Electronii care pleacă pătrund în grosimea plăcuței de siliciu și provoacă apariția, în aceasta, a electronilor de conducție. Fiecare electron primar produce în siliciu 200 000 electroni secundari de conducție, de energii mai mici. Acești electroni se deplasează prin stratul de blocare spre unul dintre electrozi; ca rezultat, între un electrod și celălalt se creează o diferență de potențial. Dacă între electrozi se stabilește o legătură printr-un circuit metalic, în acesta va apărea un curent electric care poate fi folosit în mod corespunzător.

Deoarece perioada de înjumătățire a stronțiului-90 este suficient de mare, durata de serviciu a bateriei este și ea mare și numără cel puțin 20 ani.

Cîteva plăcuțe de siliciu, conectate una cu alta în serie sau în paralel, formează o baterie care poate fi folosită cu succes pentru alimentarea emițătoarelor radiotelegrafice, a receptoarelor și a altor aparate electronice construite cu diode semiconductoare și tranzistoare.

După cum nu este greu să se observe, natura fenomenelor care se desfășoară într-o baterie atomică este analogă cu a fenomenelor ce se produc în orice celulă fotoelectrică generatoare. Unica diferență dintre celula fotoelectrică și bateria atomică constă în faptul că în primul caz semiconductorul este iradiat cu lumină, în timp ce în al doilea caz el este iradiat cu electroni.

Inventarea bateriei atomice, fără îndoială, constituie un mare succes. După ce randamentul bateriei va fi mărit pînă la cîteva procente (în prezent el este egal cu 1%), limitele domeniilor posibile de aplicații se vor extinde considerabil.

II. FERITELE

În ultimii ani, în electrotehnică — mai ales în radiotehnică — au început să se folosească materiale semiconductoare feromagnetice, așa-numitele ferite. În virtutea proprietăților lor, feritele înlocuiesc cu succes — în numeroase cazuri — alte materiale feromagnetice, în particular fierul. Pentru a ne imagina cît mai bine în ce constă sensul acestei înlocuiri, este necesar să examinăm la început, deși numai foarte superficial, ce se întîmplă cu un material feromagnetic, atunci cînd el este introdus într-un cîmp magnetic exterior.

Feromagnetismul unor metale și aliaje este explicat de fizica modernă prin faptul că în materialul feromagnetic există un număr uriaș de regiuni microscopice ca dimensiuni, numite „domenii”. Fiecare domeniu de acest fel, pînă la așa-numita temperatură Curie (punctul Curie) este deja magnetizat prin sine însuși și posedă un moment magnetic oarecare, orientat arbitrar în spațiu. La temperaturi mai mari decît punctul Curie, magnetizarea spontană dispare. Dimensiunile liniare ale domeniilor sînt de circa 10^{-4} cm la fierul moale. În absența unui cîmp magnetic exterior, momentele magnetice ale domeniilor vor avea o orientare haotică. Cînd materialul feromagnetic ajunge într-un cîmp magnetic exterior, acesta din urmă tinde să orienteze domeniile în așa fel, încît momentele lor magnetice să fie dirijate în lungul cîmpului exterior. Acest fapt este împiedicat de frecarea internă. Pînă la temperatura punctului Curie, însă, mișcarea termică nu este capabilă de a învinge influența cîmpului magnetic exterior și, o dată cu creșterea intensității acestuia, domeniile — prin urmare și momentele magnetice — se rotesc din ce în ce mai mult înspre direcția cîmpului magnetic, pînă cînd se vor aranja exact în lungul liniilor de forță ale cîmpului, ceea ce corespunde cazului saturației complete. Este cît se poate de evident că o dată cu creșterea temperaturii, cînd mișcarea termică se intensifică, cîmpului magnetic exterior îi vine din ce în ce mai greu să ordoneze orientarea momen-

teilor magnetice din interiorul domeniilor și, dimpotrivă, o dată cu scăderea temperaturii acest proces este înlesnit.

Din aspectele magnetizării materialelor feromagnetice, pe care tocmai le-am examinat, rezultă că rotirea domeniilor este însoțită de un fel de „frecare”. De aceea, când materialul feromagnetic se află într-un câmp magnetic exterior variabil, el se încălzește considerabil, ceea ce duce la o pierdere inutilă de energie. Dar încălzirea unui metal feromagnetic este condiționată încă și de o altă cauză fizică, și anume de curenții turbionari (Foucault). Intensitatea curenților turbionari este cu atât mai mare, cu cât conductibilitatea electrică a metalului este mai mare și cu cât frecvența câmpului magnetic este mai înaltă. Reamintim că tocmai această împrejurare se află la baza construcției cuptoarelor cu inducție în înaltă frecvență, cu ajutorul cărora se pot topi metale.

Dacă miezul unui transformator este confecționat sub forma unei bucăți de metal masive, în timpul funcționării transformatorului miezul se va încălzi puternic. Această încălzire inutilă va absorbi energie electrică. Cum se pot combate curenții turbionari parazitari? Există mai multe procedee. Unul dintre cele mai răspândite constă în confecționarea miezurilor transformatoarelor nu din bucăți de metale masive, ci din tole relativ subțiri, izolate între ele. O altă metodă se bazează pe folosirea unui miez din material magnetodielectric, adică din praf de fier presat, amestecat în prealabil cu o masă liantă izolantă. Există și alte căi de a realiza acest lucru.

Toate procedeele descrise devin însă neraționale la frecvențe înalte, care se întâlnesc — de exemplu — în radiotehnică. De aceea, timp de mai mulți ani s-a căutat pe toate căile o ieșire din impas. Soluția radicală a problemei a fost găsită atunci când cercetătorii au început să folosească, pentru scopurile amintite, materiale feromagnetice semiconductoare — ferite. După cum s-a dovedit, printre semiconductoare există substanțe care posedă o conductibilitate electrică foarte mică și proprietăți magnetice deosebite. Combinarea ambelor aceste proprietăți a dat posibilitatea să se folosească pe scară largă ferite în aparatele care funcționează la frecvențe înalte. Deoarece ferite au o rezistență mare, pierderile inutile — legate de curenții turbionari — devin minime în cazul lor.

Din ferite se confecționează miezurile transformatoarelor, ale bobinelor de inductanță din circuitele de frecvențe inter-

mediare și înalte, precum și alte piese radiotehnice (fig. 42). Folosirea feritelor în acest scop dă posibilitatea să se mărească factorul de calitate al bobinelor, să se micșoreze dimensiunile lor și să se varieze lin inductanța unei bobine. Ultima operație se efectuează prin deplasarea înainte și înapoi a unui miez de ferită.

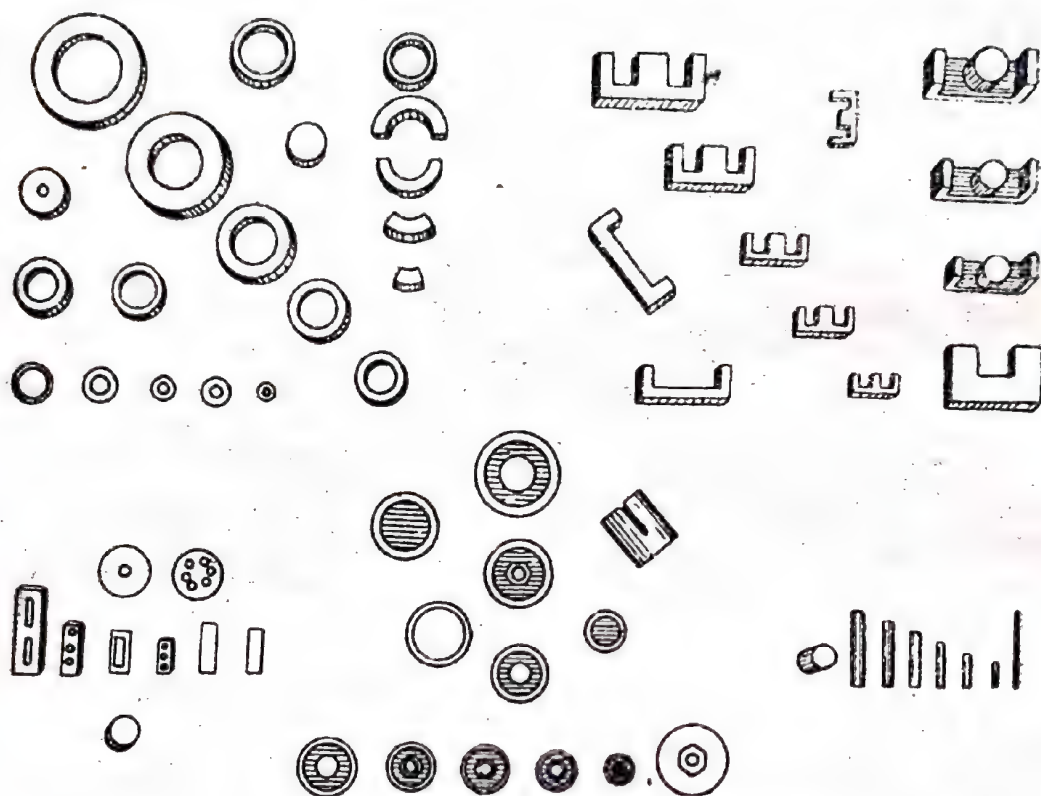


Fig. 42. Piese confecționate din ferite

12. LUMINFOARELE

În știință și tehnică încep să joace un rol din ce în ce mai important luminofoarele, niște substanțe semiconductoare care emit lumină rece. Cu ajutorul lor a fost posibil să se rezolve probleme tehnice esențiale.

Proprietatea de a emite lumină nu este un privilegiu numai al unor anumite substanțe semiconductoare. Există, de exemplu, materiale luminescente de proveniență organică. Pentru aplicațiile tehnice, însă, cea mai mare valoare o au numai luminofoarele semiconductoare.

Tehnologia fabricării compuşilor luminescenți a ajuns la un nivel atât de înalt, încât a devenit posibil să se creeze

luminofoare cu durată de luminescență diferită și cu compoziție spectrală variată.

Luminescența a numeroase substanțe continuă pentru un timp oarecare, nu prea lung, iar după aceea dispare. Substanțele de acest fel se numesc luminofoare cu acțiune temporară. Spre deosebire de acestea mai există și compuși luminescenți cu acțiune continuă, care emit lumină în decursul unui interval de timp îndelungat, ce ajunge uneori pînă la cîteva zeci de ani. O asemenea emisiune îndelungată de lumină se realizează prin faptul că în compusul luminos intră o cantitate mică de preparate radioactive, care constituie tocmai sursa de excitație a atomilor luminoforului.

Luminofoarele cu acțiune temporară, folosite în practică, trebuie să satisfacă o serie întreagă de condiții; de aceea, din infinita varietate de semiconductoare, numai cîteva sînt potrivite pentru prepararea luminofoarelor. De cea mai largă răspîndire se bucură luminofoarele avînd următoarele compoziții: sulfurile ZnS , CdS , CaS , SrS , MgS , BaS , oxizii CaO , SrO , MgO , BaO , wolframații CaWO_4 , CdWO_4 , MgWO_4 și compușii Zn_2SiO_4 , CdSiO_3 , CdB_2O_4 , ZnB_2O_4 , MgSiO_3 . Fiecare dintre aceste substanțe conține un activator, adică un adaos dintr-un metal oarecare. Pentru ca luminoforul să fie de calitate bună, este necesar ca el să fie preparat din materiale extrem de pure, fără nici un fel de substanțe străine. Condiții identice sînt impuse, firește, și procesului însuși de preparare a luminoforului, care trebuie să se desfășoare în condiții de curățenie excepțională.

O metodică judicioasă elaborată de preparare a tuturor luminofoarelor posibile, cu proprietăți dinainte date, permite să se prepare și luminofoare care, sub acțiunea luminii, înmagazinează energie, dar nu luminează ele însele. Pentru ca un asemenea luminofor să înceapă să emită lumină este necesar ca el să fie „iluminat”, în prealabil, cu raze infraroșii. În acest caz, razele infraroșii au rolul chibritului care dă foc prafului de pușcă. Energia de excitație este conținută în luminofor, dar este necesar un impuls oarecare dinafară, pentru a se elibera această energie. Iar impulsul este tocmai radiația infraroșie.

Luminofoarele cu asemenea proprietăți prezintă un mare interes practic, deoarece energia înmagazinată de ele poate fi eliberată numai atunci cînd este necesar.

Pe de altă parte, a fost elaborată și tehnologia de preparare a unor luminofoare a căror luminescență este „stinsă”

de aceleași raze infraroșii. Un astfel de luminozor după „încărcarea” la lumină, devine luminescent pentru o perioadă de timp oarecare. Este însă suficient ca el să fie „iluminat” cu radiații infraroșii, pentru ca luminescența sa să înceteze imediat. În acest caz, energia de excitație — sub acțiunea razelor infraroșii — nu se transformă în energie luminoasă, ci în energie termică.

Luminescența tuturor luminozorelor cu acțiune temporară se atenuează în timp și pînă la urmă dispare. Acest fapt este de la sine înțeles: luminozorul nu poate da mai mult decît a primit în timpul încărcării la lumină. Insuși procesul de atenuare depinde de compoziția luminozorului, de natura activatorului și urmează legile lui. Temperatura luminozorului are o influență simțitoare atît asupra intensității luminescenței lui, cît și asupra duratei de emisie a luminii. O dată cu creșterea temperaturii, luminozorul începe să lumineze mai strălucitor, dar totodată capacitatea lui de luminare se epuizează mai repede. La o temperatură suficient de scăzută, luminozorul nu radiază și toată energia de excitație înmagazinată în el rămîne ascunsă în el pînă cînd temperatura lui va crește.

Există mai multe procedee de depunere a luminozorelor pe suprafața obiectelor. Majoritatea dintre acestea constă în faptul că compusul luminescent nu este măcinat prea fin, iar pulberea obținută — compusă din grăunți relativ mari — se amestecă cu un mediu liant oarecare: lac, gelatină, o vopsea cu clei sau ulie, șelac sau alte substanțe. Masa pregătită sub formă de lichid vîscos se depune pe suprafața obiectului. Uneori, suprafața compusului luminescent se acoperă cu un lac transparent pentru a proteja compusul luminescent împotriva acțiunii dăunătoare a atmosferei.

Adesea, se amestecă substanța luminoasă cu o masă plastică și în acest caz obiectul confecționat din această masă plastică începe să devină luminescent după încărcarea la lumină.

Pentru anumite scopuri, se impregnează țesături, cu substanță luminoasă, sau se introduce substanța luminoasă în lichide, în sticlă și se prepară vopsele fosforescente.

În una dintre cărțile sale, academicianul S. I. Vavilov scria: „Nu este necesar să ai un dar deosebit al previziunii, pentru ca să prezici că nu este departe timpul cînd „lumina rece” va deveni pentru fiecare dintre noi un factor atît de inevitabil și obișnuit al vieții de zi cu zi, cum este lampa

electrică cu incandescență". Aceste cuvinte, rostite acum cîțiva ani, s-au adeverit aproape în întregime încă de pe acum: zi cu zi, „lumina rece” pătrunde din ce în ce mai profund în viața noastră obișnuită. Substanțele luminescente au început să fie folosite în secțiile uzinelor și în fermele colhoznice, în spitale și laboratoare științifice, în tehnica telecomunicațiilor și în transporturi, în instalațiile de radiolocație și televiziune, în multe ramuri ale tehnicii și economiei naționale. Pentru ilustrarea acestei afirmații, vom da cîteva exemple de aplicații în practică ale materialelor luminescente.

1. Lămpile fluorescente. Se știe că cele mai neeconomice izvoare de lumină sînt izvoarele termice, care emit lumina datorită transformării energiei termice în energie radiantă. Dintre izvoarele termice de lumină, cele mai moderne sînt lămpile electrice cu incandescență. Randamentul acestora este extrem de scăzut și nu depășește 3,5% nici chiar la lămpile cu puterea de peste 1 000 W. În ce privește lămpile de putere mică, randamentul lor este încă și mai scăzut, pentru o lampă de 40 W el fiind egal cu 1,5%. Acest randament scăzut se explică prin faptul că filamentul incandescent al lămpii emite un spectru suficient de larg. Partea principală din energia radiată, mai precis peste 90%, revine însă razelor infraroșii invizibile. De aceea, încă de mult a devenit actuală problema măririi, prin toate mijloacele posibile, a randamentului izvoarelor de lumină. În Uniunea Sovietică, în 1931, s-a făcut un pas mare în această direcție: academicianul S. I. Vavilov a propus ca suprafața interioară a pereților unei lămpi cu descărcări în gaze să fie acoperită cu un luminofor, pentru transformarea radiațiilor ultraviolete invizibile în radiații vizibile. Curînd, această idee și-au găsit soluția practică.

Lampa cu descărcări în gaze, de joasă tensiune, este de construcție simplă și reprezintă un tub de sticlă. La capetele tubului sînt lipite niște spirale de wolfram. Din tub se scoate aproape complet aerul și în locul lui se introduce argon care creează în tub o presiune de circa 4 mm col. Hg, iar după aceea o cantitate mică de vapori de mercur care dau o presiune de aproximativ 0,01 mm col. Hg. Tubul se conectează în circuit în felul în care se arată schematic în fig. 43. La început se încălzesc spiralele de wolfram, care după aceea încep să emită electroni. Electronii, zburînd prin spațiul tubului, excită moleculele gazului, iar acestea încep să emită

lumină. După ce în tub apare descărcarea în gaze, filamentul spiralelor de wolfram se deconectează automat și toată căderea de tensiune se concentrează mai ales la bornele lămpii însăși. În continuare, emisiunea de electroni de la spirale este întreținută de descărcarea însăși. Dacă suprafața interioară a pereților unei lămpi cu descărcări în gaze este acoperită cu un strat subțire de luminolor, acest dispozitiv va reprezenta tocmai lampa fluorescentă modernă.

Mecanismul proceselor care au loc în lămpile fluorescente este cât se poate de ușor de înțeles. Când lampa este conectată la rețea, în ea începe

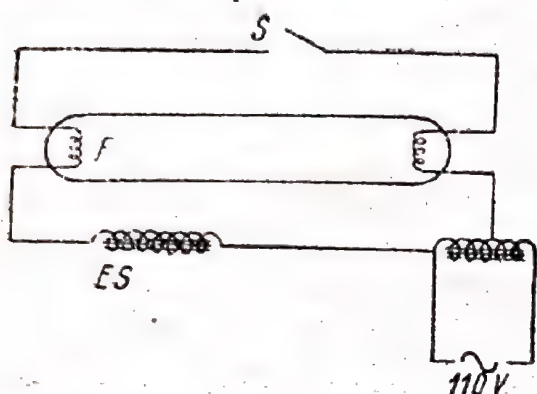


Fig. 43. Schema de conectare a unei lămpi fluorescente:

F — spirale de wolfram incandescente,
ES — bobină de șoc limitatoare de curent,
T — autotransformator, S — comutator

descărcarea în gaze, care este însoțită de luminescență. Compoziția gazului din interiorul tubului și regimul de descărcare se aleg în așa fel, încât — pe cât este posibil — cea mai mare parte din puterea radiată să revină razelor ultraviolete invizibile, iar cea mai mică parte — radiațiilor vizibile. La lămpile moderne, radiațiile ultraviolete constituie aproximativ 90% din întreaga putere radiată de lampă, iar cele vizibile — circa 30%. Absorbând radiațiile ultraviolete, substanța luminescentă depusă pe suprafața interioară a pereților lămpii emite, în conformitate cu legea lui Stokes, radiații de lungime de undă mai mare, adică radiații vizibile.

Acoperind suprafața interioară a pereților lămpii cu diferite luminofoare, se pot obține lămpi fluorescente care emit lumină de diverse culori: albastră, roză, galbenă, verde etc. Lămpile de acest fel sînt însă folosite în special pentru scopuri de reclamă sau pentru luminarea foaielor teatrelor, a cluburilor și a altor locuri publice. Aplicațiile principale ale lămpilor fluorescente sînt însă acelea în care ele sînt folosite drept izvoare artificiale de lumină albă. Dacă pereții interiori ai tubului sînt acoperiți cu un luminozor complex, care constituie un amestec de diferite luminofoare, se poate face ca lampa să emită o lumină apropiată, prin compoziția ei spectrală, de lumina naturală a zilei. Lămpile de acest fel se numesc lămpi de lumină a zilei și sînt folosite și în Uniunea Sovietică pe scară foarte largă.

Ce avantaje prezintă lămpile fluorescente în comparație cu alte izvoare de lumină? Avantajele principale ale acestor lămpi constă în faptul că, în primul rînd, ele sînt mult mai economice decît lămpile electrice cu incandescență; în al doilea rînd, radiația lor este distribuită pe o suprafață relativ mare; în al treilea rînd, se poate modifica ușor compoziția spectrală a luminii emise și, în fine, durata lor de serviciu este de cel puțin trei ori mai lungă decît durata de serviciu a lămpilor cu incandescență. În prezent, lămpile de lumină a zilei posedă un randament care, la lampa de 40 W, ajunge pînă la 7,2%, în timp ce o lampă cu incandescență de 40 W are un randament de numai 1,5%. Este adevărat că o dată cu creșterea puterii lămpilor cu incandescență randamentul lor se mărește pînă la 3,5%, totuși — în medie — randamentul lămpilor fluorescente este de 3 ori mai mare decît randamentul lămpilor cu incandescență, ceea ce — la mărimea Uniunii Sovietice — constituie, fără îndoială, un factor de excepțională importanță. Durata de serviciu a lămpilor cu incandescență depășește rareori 1 000 ore. În cazul unei exploatări normale, lămpile fluorescente ies însă din funcțiune după cel puțin 3 000 ore de lucru. Firește, toate aceste avantaje nu constituie limita celor ce se pot obține. Înțelegerea mecanismului intim al proceselor de fluorescență ne dă motive serioase să sperăm că toți parametrii lămpii fluorescente, în special randamentul ei, vor putea fi considerabil măriți. În orice caz, se poate afirma cu îndrăzneală că peste cîțiva ani iluminatul artificial va fi asigurat mai ales cu lămpi de lumină a zilei, perfecționate.

2. Analiza pe bază de luminescență. Majoritatea substanțelor, cu foarte rare excepții, posedă capacitatea de a emite radiații proprii sub influența radiațiilor violete; aceste radiații diferă, la unele dintre ele, atît în ce privește culoarea, cît și intensitatea lor. Aceste proprietăți au dat posibilitatea ca în multe cazuri să se folosească așa-numita analiză pe bază de luminescență.

Cu ajutorul acestui mod de analiză se poate determina prezența unei substanțe oarecare. Ca exemplu se poate arăta că această metodă de analiză permite să se detecteze 10^{-13} g fluoresceină, dizolvată în 1 cm³ de apă. La iradierea soluției cu raze ultraviolete, soluția emite o lumină verde. Prin aceeași metodă se poate determina conținutul la unele vitamine. În acest caz, precizia analizei este considerabil mai mare decît precizia analizei chimice calitative și cantitative

obișnuite. În funcție de culoarea luminii emise, se pot distinge foarte precis unele sorturi de făină de altele, sau se poate determina calitatea ovăzului și a altor câteva grâne. Analiza bazată de fotoluminescență a pătruns adânc nu numai în tehnică și știință, dar și în agricultură. Cu ajutorul ei se determină gradul de stricăre a legumelor, fructelor, produselor uleioase, peștelui, ouălor, faptul cel mai remarcabil fiind că această metodă permite să se stabilească începutul procesului de stricăre în stadiul lui cel mai timpuriu, ceea ce are o importanță mare, în special la fabricarea conservelor.

Analiza bazată pe luminescență, folosită în tehnică, permite să se efectueze sortarea sigură a sticlei optice, a hîrtiei șmirghel și a multor alte substanțe. Metoda luminescenței este utilizată și în defectoscopie. Ca exemplu se poate arăta că, cu ajutorul ei se descoperă cele mai fine fisuri din produsele confecționate din metal sau alte materiale. În acest scop, piesa cercetată se introduce, pentru o perioadă de timp oarecare, într-o vană care conține o soluție fluorescentă încălzită. Dacă în piesă există fisuri, soluția va intra în mod obligatoriu în ele. La examinarea cu raze ultraviolete, ele vor fi descoperite ușor.

Analiza bazată pe luminescență este folosită și pentru determinarea gradului de puritate al multor reactivi. În industria textilă, a hîrtiei, chimică, a aparatelor electrice cu vid și în altele, metoda de analiză bazată pe luminescență se folosește pe scară foarte largă și cu mare succes. În afară de toate cele arătate, cu ajutorul ei se realizează destul de simplu și sigur toate operațiile posibile de sortare și rebutare.

Analiza bazată pe luminescență se folosește în prospecțiunile geologice pentru descoperirea petrolului, în hidrogeologie — pentru descoperirea scurgerilor dintre rezervoarele de reținere, în paleontologie — pentru studiul florei și faunei preistorice etc.

În criminologie și în expertizele medico-legale, analiza bazată pe luminescență a devenit unul dintre mijloacele de cercetare cele mai importante. Ea permite să se descopere toate felurile posibile de falsuri, plastografii și urme de scris mascate cu grijă. Fizicianul sovietic D. N. Lazarev, în una dintre cărțile sale, scrie: „Metoda luminescenței vine în ajutorul experților la identificarea briliantelor false și la stabilirea autenticității tablourilor”. R. Ia. Gasul și A. A. Sakov au descris un caz cînd un colecționar, care a cumpărat un tablou cu semnătura Aivazovski, s-a îndoit de autenticitatea lui și

a intentat o acțiune judiciară împotriva persoanei care i-a vândut tabloul. Expertii convocați au fost de păreri diferite: doi au afirmat că tabloul este original, iar doi au susținut că este o imitație. Disputa a fost rezolvată numai după iradierea tabloului cu lumină neagră (ultravioletă), sub acțiunea căreia pe tablou a fost descoperită o a doua iscălitură (sub iscălitura falsă cu numele Aivazovski), care a devenit luminoasă sub stratul de vopsea de ulei depus peste ea și care reprezenta spumă de mare.

Prof. K. I. Tatiev a descris un caz din practica poliției judiciare, când metoda de cercetare prin intermediul luminescenței a permis să se descopere făptașii unui furt săvârșit la un depozit de blănuri. În decursul unei perioade de timp îndelungate, la acest depozit s-au observat sustrageri sistematice de piei de astrahan. De furt au fost bănuți paznicii de noapte, dar nu existau dovezi. O dată, înainte de închiderea depozitului, lucrătorii poliției judiciare au presărat pe nevăzute salicilat de sodiu pe blănuri. Când în dimineața următoare a fost descoperit un nou furt, bănuții au fost aduși într-un laborator și iradiați cu lumină neagră. La unul dintre paznici s-a observat că întreaga îmbrăcăminte, din cap până în picioare, devenise luminescentă, lumina emisă având culoarea violetă caracteristică pentru preparatele salicilice.

Analiza bazată pe luminescență este folosită și ca mijloc de efectuare a expertizelor prin care se stabilește atât autenticitatea unei opere de artă, cât și — în unele cazuri — vârsta ei. Aceeași metodă dă posibilitatea să se descopere o restaurare invizibilă, oricât de fină și iscusită ar fi ea. O vază de flori lipită, o sculptură sau orice altă operă restaurată își dezvăluie ușor cusururile sub acțiunea radiațiilor ultraviolete. În acest caz, locurile de îmbinare emit o lumină fluorescentă diferită de aceea a celorlalte părți ale obiectului. La fel, la tablourile restaurate se descoperă — sub acțiunea razelor ultraviolete — locurile restaurate.

În multe cazuri, metoda luminescenței permite să se efectueze nu numai o analiză calitativă precisă, dar și una cantitativă, fapt care are o importanță deosebit de mare pentru o serie întreagă de ramuri ale tehnicii.

3. Vederea nocturnă. Dezvoltarea științei despre luminescență și substanțele luminescente a permis să se rezolve problema vederii în întuneric, care cândva părea cu totul imposibilă. La abordarea acestei probleme științifice dintre cele

mai serioase au participat mulți învățați și au fost încercate suficient de multe metode. Cele mai reușite s-au dovedit metodele care implicau folosirea, în acest scop, a luminosoarelor. Ca rezultat al unei munci de cercetare de mai mulți ani, s-a reușit să se elaboreze două metode diferite una de alta și, pe baza lor, să se construiască aparate care permit vederea nocturnă.

Principiul de funcționare al unui aparat de acest fel constă în următoarele. Razele infraroșii produse de un izvor special sînt îndreptate spre un obiect. Razele infraroșii invizibile reflectate de obiect sînt captate de un aparat, în care sînt transformate în radiații vizibile și pe un ecran special apare o imagine clară.

Piesa principală și cea mai importantă a unui asemenea aparat este un ecran fosforescent confecționat dintr-un luminofor special. Tocmai pe acest ecran are loc transformarea radiațiilor invizibile în radiații vizibile.

Fizicienii au învățat să prepare substanțe fosforescente care, după o iluminare preliminară, încep să lumineze strălucitor numai după ce sînt iradiate cu raze infraroșii. Dacă dintr-un luminofor de acest fel se confecționează un ecran fosforescent special, iar după aceea — în decursul unei perioade de timp oarecare — acesta este supus iradierii cu raze vizibile, întreaga energie a lumini incidente va fi înmagazinată în ecran. După o asemenea încărcare la lumină, ecranul fosforescent capătă proprietatea de a emite el însuși lumină și anume deosebit de intens, sub acțiunea razelor infraroșii. Acest ultim fapt are un rol important la aparatele de vedere nocturnă.

Construcția schematică a unui aparat de acest fel pentru vederea în obscuritate este următoarea.

Ecranul fosforescent este montat într-un sistem optic special, care reprezintă un grup de lentile destinate să proiecteze — pe suprafața ecranului — imaginea în raze infraroșii a obiectelor observate. Înainte de folosirea aparatului, ecranul este supus unei iradierii cu lumină, mai mult sau mai puțin îndelungată. După încărcarea la lumină, aparatul este gata pentru funcționare.

Ecranul fosforescent, care s-a găsit la lumină pentru un timp oarecare, este gata în orice moment să cedeze înapoi, sub formă de lumină, energia primită anterior de el. Este numai necesar ca el să fie „iluminat” cu raze infraroșii.

Razele infraroșii reflectate de obiecte ajung la sistemul optic al aparatului, cu ajutorul căruia se proiectează pe ecran imaginea obiectelor respective.

Sub acțiunea razelor infraroșii, ecranul începe imediat să emită lumină, iar deoarece diferitele puncte ale ecranului sînt iradiate cu raze infraroșii de intensitate diferită, la rîndul lor aceste puncte ale ecranului vor radia raze vizibile de intensitate diferită, în deplină concordanță cu forma și aspectul obiectului, și pe ecran va apărea imaginea lui. Acesta este principiul de funcționare al dispozitivului pentru vedere nocturnă în care se folosește un ecran confecționat dintr-un luminozor ce posedă proprietatea de a transforma radiațiile infraroșii invizibile în radiații vizibile.

În afară de principiul descris, există și altul, mai perfecționat, bazat pe folosirea efectului fotoelectric exterior. În dispozitivele construite pe baza acestui principiu și denumite traductoare electrono-optice (convertoare de imagini), rolul principal revine unei celule fotoelectrice și unui ecran fluorescent.

După cum se știe, substanțele fluorescente pot emite lumină proprie nu numai sub acțiunea unor raze vizibile. Fluorescența apare și sub acțiunea razelor ultraviolete invizibile. Substanța devine fluorescentă la fel de bine și dacă ea este iradiată cu un flux de electroni. Această proprietate a substanțelor fluorescente și-a găsit aplicații numeroase într-o serie întreagă de aparate electrice, inclusiv traductoarele electrono-optice.

Schematic, un traductor electro-optic are următoarea construcție.

Se confecționează un cilindru de sticlă cu pereți dubli. Cilindrul are două funduri. Prin aspectul lui exterior, el poate fi comparat cu niște pahare de diametre diferite, introduse unul în celălalt.

Pe fundul interior, așa cum se arată în fig. 44, este depus un strat de substanță fluorescentă — luminozorul. Pe fundul exterior, și anume pe acea suprafață care este îndreptată spre ecranul fluorescent, sînt depuse două straturi metalice. Primul dintre ele este o peliculă semitransparentă de argint, prin care razele luminoase trec bine. Cel de-al doilea este un strat de cesiu extrem de fotosensibil la radiațiile infraroșii.

Care este rolul celui de-al doilea fund, cu straturile de argint și cesiu?

Fundul exterior al traductorului electrono-optic servește drept fotocatod.

„Lumina” infraroșie incidentă pe fotocatod trece la început printr-un sistem optic alcătuit din lentile speciale transparente pentru razele infraroșii, apoi trece prin grosimea fundului de sticlă, după aceea traversează stratul extrem de subțire de argint, ajunge la pelicula de cesiu fotosensibilă și smulge de acolo electroni, adică apare efectul fotoelectric obișnuit. Numărul electronilor eliberați este, firește, cu atât mai mare, cu cât lumina este mai intensă. Această proprietate a efectului fotoelectric permite să se rezolve radical problema vederii nocturne. Dacă nu ar exista această legă importantă, nu ar fi posibil, folosind un traductor electrono-optic, să se vadă în întuneric.

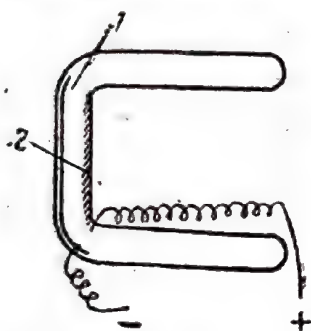


Fig. 44. Construcția schematică a unui traductor electrono-optic (convertor de imagini):

1 — fotocatod, 2 — ecran fluorescent

Cum apare imaginea într-un asemenea aparat? Pentru ca ea să se ivească, este necesar ca obiectele observate să fie iradiate cu lumină infraroșie. Razele infraroșii reflectate de obiecte ajung la obiectivul aparatului, care proiectează pe fotocatod imaginea acestora în raze infraroșii. Ca urmare, apare efectul fotoelectric exterior, adică din fiecare punct al suprafeței stratului de cesiu zboară electroni; în acest caz, numărul de fotoelectroni va fi strict proporțional cu

intensitatea luminii incidente în punctul respectiv. Deoarece diferitele puncte ale suprafeței fotocatodului sînt luminate cu raze de intensitate diferită, ca urmare a faptului că pe el se proiectează imaginea unor obiecte, rezultă că aceste puncte vor emite un număr diferit de electroni.

În mod obișnuit, sub acțiunea luminii, electronii zboară de la suprafața fotocatodului în toate direcțiile posibile. Pentru obținerea unei imagini, acest lucru nu este convenabil și este absolut necesar ca întreaga masă de electroni să se deplaseze pe niște traiectorii liniare, perpendiculare pe suprafețele fotocatodului și ecranului fluorescent.

În acest scop, între suprafața stratului de cesiu și ecranul fluorescent se creează un câmp electric de înaltă tensiune: la fotocatod se conectează conductorul de la borna negativă a unei surse de tensiune, iar la ecran — de la cea pozitivă. Câmpul electric puternic produs de o tensiune de cîteva mii de volți obligă întreaga masă de electroni să se deplaseze pe

traieectorii drepte. Imaginea în raze infraroșii, proiectată pe fundul exterior al traductorului electrono-optic, produce o imagine electronică: din diferite puncte ale fotocatodului de cesiu zboară un număr diferit de electroni, proporțional cu intensitatea luminii. Imaginea electronică este transportată în întregime, fără a suferi deformări, pe ecranul fluorescent, pe care apare imaginea obiectului, strălucitoare și clar vizibilă; acele puncte ale ecranului în care ajung un mare număr de electroni strălucesc mai puternic, iar celelalte puncte — supuse șocurilor unui număr mai mic de electroni — par mai întunecate și, prin urmare, pe întregul ecran se va vedea clar imaginea obiectului.

Firește, aparatele pentru vedere nocturnă nu pot transmite culorile vii ale obiectelor ce ne înconjoară, însă scopul final — vederea în obscuritate deplină — poate fi atins cât se poate de bine cu ajutorul lor. Este evident că, pentru a vedea în întuneric complet, în afară de aparatul descris este necesar și un proiector care „să ilumineze” spațiul cu lumină infraroșie; numai atunci razele infraroșii reflectate de obiectele considerate, ajungând la aparat, dau posibilitatea să se vadă porțiunea iluminată de el și tot ce se găsește în ea.

4. **Ecrane fluorescente.** În multe aparate științifice și tehnice foarte importante, un rol mare revine unui ecran fluorescent. Adesea, una dintre condițiile impuse materialului din care este confecționat ecranul este ca timpul de fluorescență să fie cât mai scurt posibil, iar strălucirea — cât mai mare cu putință.

Ecranele fluorescente se folosesc pe scară foarte largă; de aceea ne vom limita la o descriere foarte succintă numai a aplicațiilor lor mai importante.

a) *Radioscopia.* O parte inseparabilă a oricărei instalații de radioscopie, folosită pentru vederea prin transparență în interiorul corpurilor, este ecranul fluorescent. Trecând prin piesa iradiată și ajungând la ecran, razele Roentgen îl obligă pe acesta să devină fluorescent. Intensitatea luminii emise de ecran, între anumite limite, este cu atât mai mare, cu cât intensitatea radiațiilor Roentgen este mai mare. De aceea, iradiind un lingou metalic oarecare, cu ajutorul ecranului se pot descoperi golurile din interiorul lui. Aceasta se poate face deoarece, trecând prin grosimea lingoului, razele Roentgen ajung la ecran atenuate. Gradul de atenuare a razelor va fi însă diferit, în funcție de omogenitatea lingoului. Razele Roentgen nu sînt absorbite de goluri, de aceea, în dreptul

lor se vor vedea pe ecran pete mai strălucitoare decât în dreptul celorlalte părți ale lingoului.

Iradieră cu raze Roentgen se folosește tot atât de mult și în practica medicală. „Luminînd” cu ele un om, medicul radiolog poate observa — cu ajutorul ecranului fluorescent — starea organelor interne. De exemplu, razele Roentgen permit să se determine cu mare precizie locul fracturilor coastelor și regiunile unde cineva a fost rănit cu gloanțe sau schije.

b) *Oscilograf catodic*. Partea principală a oscilografului catodic este tubul catodic cu ecran fluorescent. Un fascicul de electroni care se deplasează cu viteză mare ajunge la un ecran fluorescent și în acest loc apare un punct puternic strălucitor. Dacă fasciculul electronic nu „stă pe loc”, ci începe să parcurgă ecranul, el va trasa pe acesta linii diferite ca formă, care devin bine vizibile și reflectă caracterul proceselor studiate.

c) *Televiziunea*. Fără a analiza amănunțit principiul transmiterii imaginilor în televiziune, vom arăta numai că, în televiziune, îndeplinește o funcție esențială tubul videoreproductor cu ecran fluorescent (kinoscopul), pe care apare imaginea transmisă.

5. Vopsele luminoase. Substanțele fosforescente, precum și substanțele luminoase cu acțiune continuă reprezintă materiale care, practic, nu pot fi înlocuite cu nici un fel de alte materiale în majoritatea cazurilor.

Este cât se poate de natural faptul că substanțele luminoase și-au găsit vaste aplicații în armată și în tehnica militară.

Cifrele și indicativele tuturor aparatelor instalate la bordul avioanelor, tancurilor și automobilelor sînt acoperite cu o substanță fosforescentă cu acțiune continuă. În decursul tuturor zborurilor de noapte și în timpul deplasărilor, pilotul, tanchistul sau șoferul văd minunat de bine indicațiile aparatelor, chiar și în obscuritate completă.

În timpul ultimului război mondial, pe multe șosele supuse unui regim de camuflare totală, unele inscripții și plăci indicatoare, care arătau amplasarea unui adăpost sau unui punct de prim ajutor, erau scrise cu vopsea fosforescentă, ceea ce permitea populației să se orienteze repede în cazul unei alarme aeriene obișnuite.

Tunurile și mitralierele pot fi prevăzute cu vizoare acoperite cu o substanță fosforescentă. Pentru dislocarea în

secret în timpul nopții, dintr-un punct în altul a tancurilor, tunurilor autopurtate și altor mijloace militare, cu farurile acoperite, se folosesc semnale de stop fosforescente. Acestea sînt niște discuri luminoase mici, acoperite cu vopsea fosforescentă. Un tanchist care merge în spate vede în fața lui un cerc luminos, fixat pe partea posterioară a tancului care merge în față și, datorită acestui fapt, conducătorul are posibilitatea să respecte distanța necesară. Folosirea semnalelor de stop fosforescente a permis să se evite nenumărate accidente care se întîmplă în timpul deplasărilor nocturne ale coloanelor de tancuri și automobile.

În condițiile celei mai complete obscurități, cînd apare necesitatea de a se citi un ordin oarecare sau să se examineze harta terenului, se folosesc lupe speciale, a căror suprafață interioară este acoperită cu o substanță fosforescentă cu acțiune continuă.

Cu vopsea fosforescentă se acoperă indicatoarele de pe șosele, din locurile periculoase, cele care arată locul de amplasare a punctului de prim ajutor pe cîmpul de luptă, așezarea postului de comandă etc.

În războiul trecut, în multe țări s-au folosit jetoane luminoase aruncate pe sol. În funcție de lumina unui asemenea reper se poate observa apropierea infanteriei.

Firește, tot atît de numeroase sînt și aplicațiile pașnice ale vopselelor fosforescente în industrie.

13. TERMoelectrogeneratoare

În primul capitol al acestei cărți s-a vorbit despre modul în care apare forța termoelectromotoare într-un circuit format dintr-un semiconductor electronic și unul cu goluri. Tot acolo s-a arătat că fenomenele termoelectrice permit să se realizeze transformarea energiei termice direct în energie electrică. În ciuda acestei particularități extrem de importante, termoelectricitatea a rămas — timp de mai mulți ani — mai curînd un fenomen curios decît un factor important, capabil să contribuie la rezolvarea unor probleme energetice de mare amploare.

„Dintre marile descoperiri ale lui Oersted, Ampère și Faraday, — scrie academicianul A. F. Ioffe — termoelectricitatea a atras atenția numai în mică măsură. Ulterior, folosirea ei pentru măsurarea temperaturilor a rămas în umbră în comparație cu electromagneții, mașinile electrice și transfor-

matoarele. Ea a rămas astfel în anticamera fizicii". Această situație își găsește explicația în faptul să randamentul termocuplurilor metalice este excesiv de scăzut. El se numără în sutimi și numai în cazuri optime — în zecimi de procent. Această valoare atât de mică a randamentului este determinată în special de două cauze: cantitatea considerabilă de energie termică consumată inutil, aplicată lipiturii calde, și valoarea mică a coeficientului de forță termoelectromotoare.

Apariția pe arena științei a semiconductoarelor, dintre care multe posedă proprietăți termoelectrice remarcabile, a modificat radical situația. Analiza naturii fizice a substanțelor semiconductoare și a posibilităților lor a inspirat academicianului A. F. Ioffe, acum aproximativ 25 ani, ideea posibilității de utilizare practică a fenomenului termoelectric pentru transformarea directă a energiei termice în energie electrică, cu un randament relativ mare. Ca rezultat al activității de două decenii și jumătate a academicianului A. F. Ioffe și a colaboratorilor lui, au fost studiate în amănunt legile fenomenelor termoelectrice la cele mai diverse substanțe semiconductoare, și pe baza acestei activități pur științifice a fost posibil să se proiecteze și să se construiască mai multe tipuri de termoelectrogeneratoare, adică aparate care realizează transformarea directă a energiei termice în energie electrică.

Unul dintre generatoarele de acest fel — generatorul TTK-3, creat la Institutul de semiconductoare al Academiei de Științe a U.R.S.S., în colaborare cu Ministerul Telecomunicațiilor al U.R.S.S., este fabricat încă de câțiva ani de către întreprinderea „Termoelektroghenerator”. Termoelectrogeneratorul TTK-3 cu 20 elemente (un termoelectrogenerator de 3 W, cu petrol lampant) capătă energia termică necesară de la o lampă cu petrol „Molnia”, și este destinat să alimenteze receptoarele de baterie „Ródina-47”, „Rodina-52”, „Iskra”, „Б-2” și altele asemănătoare.

Înainte de a răspunde la întrebarea cum este alcătuit acest generator, este necesar să facem următoarea observație: dacă se alcătuiește un circuit din două semiconductoare, unul electronic și celălalt cu goluri, și se închide acest circuit printr-un receptor oarecare de energie electrică, iar după aceea se creează între lipituri o diferență de temperatură, în circuit va apărea un curent termoelectric. În acest caz, curenții termoelectricsi I_- și I_+ , care apar în fiecare ramură separat, se adună formînd curentul I_0 al termocuplului, a cărui va-

loare este $I_0 = I_- + I_+$. Considerînd acest fenomen din punct de vedere al forței termoelectromotoare care apare la capetele cuplului, trebuie să menționăm că pentru acest exemplu este caracteristică și extrem de importantă împrejurarea că coeficientul de forță termoelectromotoare α_0 , reprezintă suma coeficienților ce caracterizează ramura electronică și cea cu goluri, adică $\alpha_0 = \alpha_- + \alpha_+$. Atunci, forța termoelectromotoare totală E , care apare la capetele unui asemenea termocuplu, va avea valoarea

$$E = \alpha_0 (T_2 - T_1) = (\alpha_- + \alpha_+) (T_2 - T_1).$$

Conectînd în serie n termocupluri semiconductoare, este posibil ca pentru aceeași diferență de temperatură să se obțină o forță termoelectromotoare de n ori mai mare. Pe de altă parte, conectînd n termocupluri în paralel, se poate obține — la aceeași diferență de temperatură — un curent de scurtcircuit de n ori mai intens (rezistența circuitului exterior este foarte mică).

Tocmai pe baza acestui principiu a fost construit termoelectrogeneratorul TFK-3 (fig. 45).

Dintr-o substanță semiconductoare specială se confecționează niște plăcuțe mici de formă dreptunghiulară. La părțile frontale ale acestor plăcuțe se presează niște sîrmușe scurte, cu ajutorul cărora plăcuțele sînt conectate în serie, formînd două termobaterii. Toate lipiturile la care se aplică căldură sînt încălzite de gazele fierbinți ale lămpii cu petrol. Celelalte lipituri sînt răcite de aerul din cameră. Pentru crearea unei mari diferențe de temperatură, lipiturile răcite sînt legate la cele 28 de aripioare metalice ale radiatorului. Peste fitilul lămpii se așază, în locul sticlei obișnuite, o

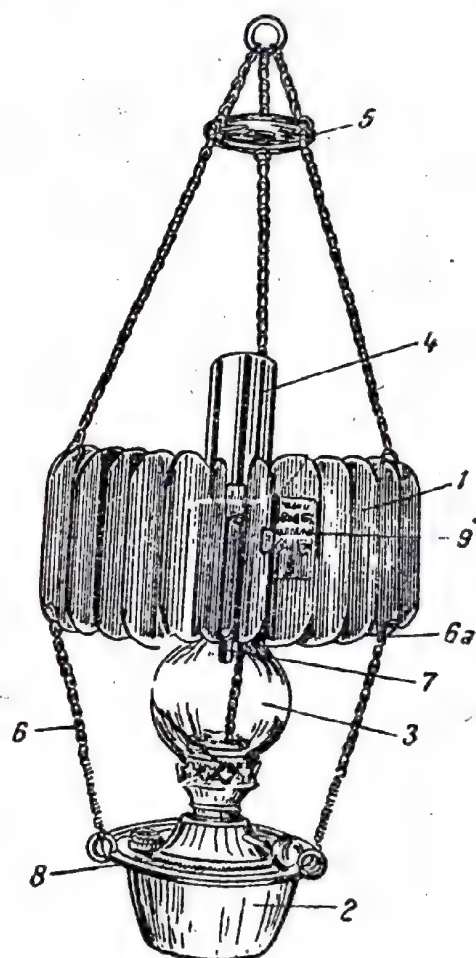


Fig. 45. Aspectul general al termoelectrogeneratorului TFK-3:

1 — termoadaptor, 2 — lampă cu petrol, 3 — sticlă de lampă, 4 — tub metalic, 5 — dispozitiv de suspensie pentru termoadaptor, 6 — dispozitiv de suspensie pentru lampă cu petrol, 6a — lanț demontabil, 7 — încălzitor, 8 — inel demontabil, 9 — plăcuțe cu borne

sticlă de lampă scurtată, fără partea ei cilindrică superioară. În deschizătura sticlei se introduce încălzitorul, la a cărui parte superioară este amplasat un tub metalic ce creează tirajul necesar pentru arderea lămpii. Termoelementele sînt amplasate radial în jurul încălzitorului și anume în așa fel, încît lipiturile lor exterioare vin în atingere cu aripioarele radiatorului, iar cele interioare — cu peretele fierbinte al încălzitorului. În cazul cînd lampa arde normal, temperatura lipiturilor interioare ale termoelementelor ajunge pînă la aproximativ 380°C , în timp ce temperatura lipiturilor exterioare nu depășește $70\text{--}80^{\circ}\text{C}$. Dacă diferența de temperatură dintre lipiturile exterioare și cele interioare este de 300°C se produce o forță termoelectromotoare mai mult decît suficientă, care provoacă apariția în circuit a unui curent care asigură din plin alimentarea radioreceptoarelor de tipurile indicate mai sus.

Atît partea anodică cît și cea de încălzire ale termoelectrogeneratorului TTK-3 sînt formate dintr-un număr redus de termoelemente conectate în serie. Forța termoelectromotoare dezvoltată de ele este absolut suficientă pentru circuitele de filament, dar nu este suficientă pentru alimentarea ano-

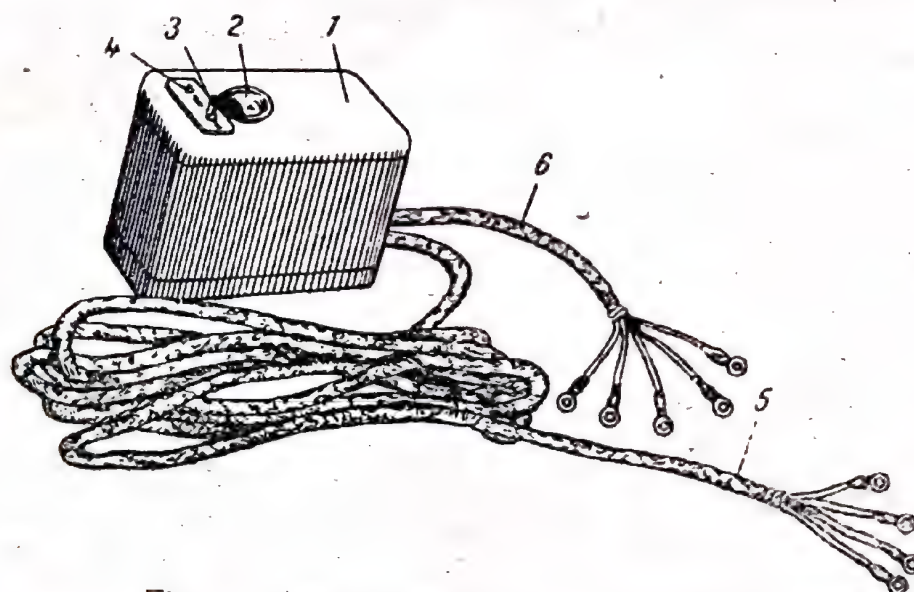


Fig. 46. Aspectul general al unui vibrator:
1 — carcasa, 2 — aparat de măsurat, 3 — întrerupător basculant, 4 — lampă de semnalizare, 5 — cordon de conectare la termoelectrogenerator, 6 — cordon de conectare la receptor

dică. De aceea, trebuie să se recurgă la ajutorul unui vibrator, un aparat care servește la transformarea unei tensiuni continue joase într-o tensiune continuă înaltă. Vibratorul, al cărui aspect exterior este arătat în fig. 46, este montat pe

un șasiu de dimensiuni mici, acoperit de un capac metalic. Pe partea superioară a capacului se amplasează un voltmetru, care servește în mod special la controlarea tensiunii circuitelor de filament, o lampă de semnalizare și un întrerupător basculant destinat să conecteze și să deconecteze vibratorul.

Dintr-un perete al cutiei vibratorului ies două cordoane, fiecare dintre acestea fiind format la rîndul lui din patru conductoare de culori diferite. Cordonul scurt (0,5 m) se conectează la radioreceptor, iar cel lung (5,5 m) servește la conectarea la regleta termoelectrogeneratorului.

Generatorul TTK-3 deservește mai multe tipuri de radioreceptoare, de aceea, pentru fiecare radioreceptor există o schemă de conectare proprie. În fig. 47 este reprezentată schema de conectare a receptorului „Rodina-47”.

Bornele de ieșire ale celor două termobaterii sînt legate la cele cinci borne ale regletei. Două borne servesc la conectarea vibratorului, iar celelalte trei — la conectarea circuitelor de filament ale radioreceptorului. Termoelectrogeneratorul TTK-3, împreună cu dispozitivul de suspendare, are o înălțime de 1 000 mm, iar diametrul lui este de 300 mm. Greuta-

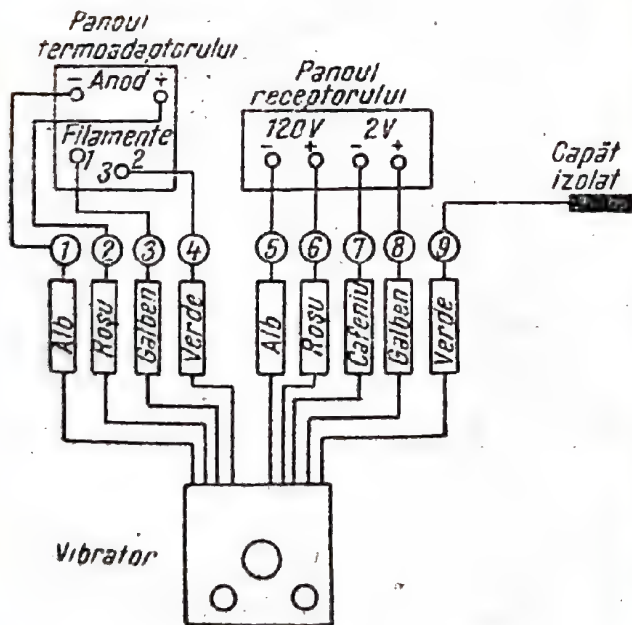


Fig. 47. Schema conectării termoelectrogeneratorului la receptorul „Rodina-47”

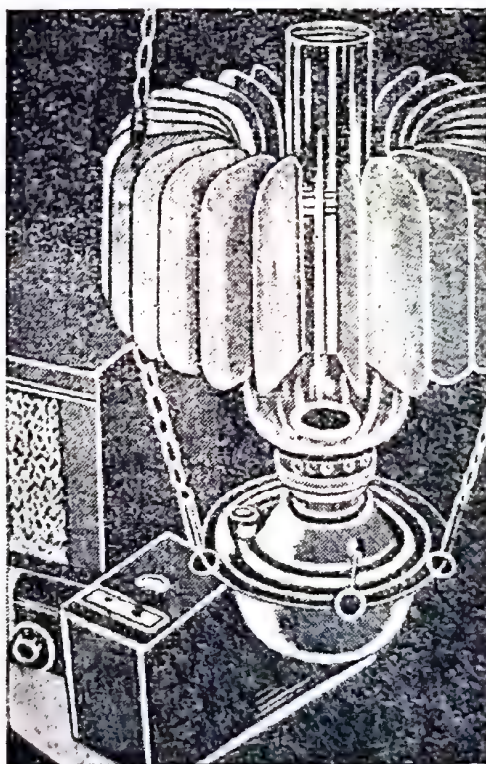


Fig. 48. Aspectul exterior al termoelectrogeneratorului TTK-3

tea lui, fără vibrator, este de 8 kg. Vibratorul împreună cu cordonul de legătură cântărește 3 kg și are dimensiunile 189×132 mm. În fig. 48 este arătat aspectul exterior al termoelectrogeneratorului TFK-3, împreună cu receptorul și vibratorul.

În rezervorul lămpii cu petrol „Molnia” cu 20 elemente, încap 3/4 l petrol. În cazul unui consum de combustibil de 60—70 g/h lampa încărcată complet cu petrol permite o funcționare continuă de aproximativ 8 ore. Durata de serviciu a generatorului este de cel puțin 4 000 ore.

Nu este întâmplător faptul că termoelectrogeneratorul TFK-3 are drept sursă de căldură o lămpă cu petrol. Prin aceasta se realizează două scopuri. Lămpa cu petrol iluminează încăperea și, simultan, oferă posibilitatea de a se asculta emisiunile de radio.

Termoelectrogeneratoarele TFK-3 și-au găsit vaste aplicații în raioanele neelectrificate ale Uniunii Sovietice. Ele sînt de neînlocuit în condițiile expedițiilor de explorare, în excursiile pe distanțe mari și pot fi utile și în cele mai diverse cazuri cînd nu există la dispoziție surse de energie electrică.

Fabrica „Termoelektroghenerator” a început să livreze un model îmbunătățit de generator TFK-2-2, care se deosebește de cel precedent prin faptul că nu conține vibrator. Cele două termobaterii ale generatorului TFK-2-2 asigură în întregime alimentarea atît a circuitelor de filament ale radioreceptorului, cît și a celor anodice.

La Institutul de semiconductoare a fost realizat încă un tip de termoelectrogenerator, TGV-1, cu puterea de 15 W, care alimentează stația de radio „Urojai”, destinată SMT-urilor pentru comunicațiile între brigăzile de tractoare. Energia termică necesară acestui generator este furnizată de un primus obișnuit cu petrol (fig. 49). Se efectuează lucrări de realizare și a altor tipuri de termoelectrogeneratoare, deocamdată de putere mai mică. Cu toate acestea, încă de pe acum iese clar în evidență perspectivele viitoare. Nu există nici un fel de îndoială că în viitorul apropiat, fizicienii în colaborare cu tehnicienii vor crea termoelectrogeneratoare de mare putere cu semiconductoare, cu durata de serviciu îndelungată și cu un randament înalt. Cît de repede se va întîmpla aceasta? Este dificil să se facă previziuni, chiar dacă acestea se bazează pe fundamentul solid al faptelor științifice. Este limpede doar un singur lucru: o problemă

care pînă nu de mult părea fantastică și irealizabilă, va fi fără îndoială soluționată. Viitoarele termoelectrogeneratoare cu semiconductoare, firește, nu vor înlocui absolut toate cele-

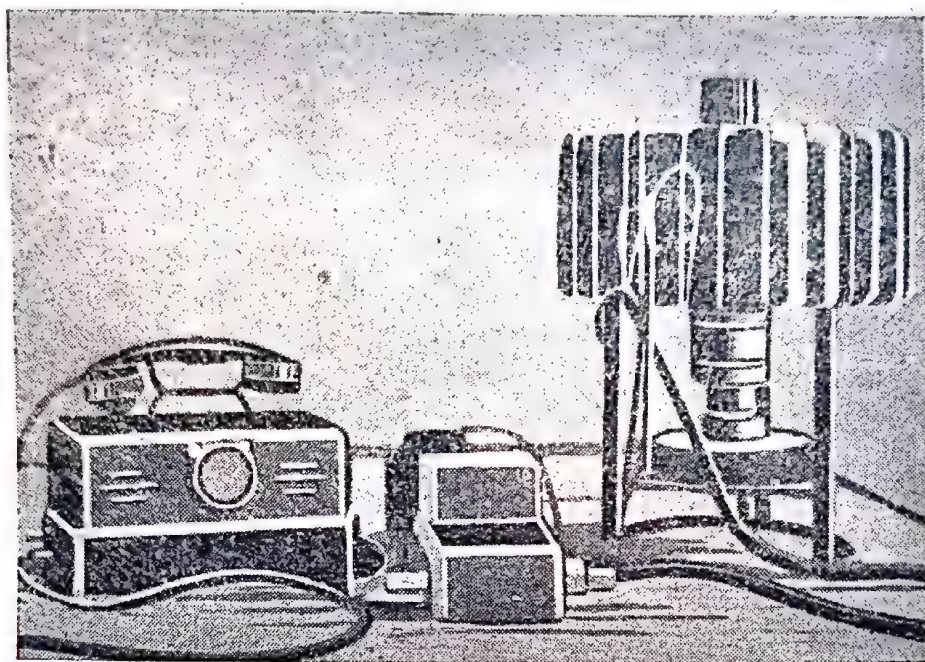


Fig. 49. Termoelectrogeneratorul TTY-1 cu stația de radio „Urojai“

alte surse de curent, dar ele se vor răspîndi pe scară largă și vor căpăta extrem de multe aplicații.

14. INSTALAȚII DE RĂCIRE TERMoeLECTRICE

În strînsă legătură cu problema pe care tocmai am examinat-o este și o altă problemă tehnică, de asemenea extrem de importantă: obținerea pe cale termoelectrică a frigului. Aceasta se bazează pe un fenomen descoperit încă în 1834 de către fizicianul francez Jean Peltier.

Coeficientul lui Peltier, P , este proporțional cu coeficientul de forță termoelectromotoare α , iar acesta din urmă are la semiconductoare o valoare mai mare decît la metale. Acest fapt important a permis academicianului A. F. Ioffe să atragă atenția cercetătorilor asupra posibilității de obținere a frigului prin intermediul efectului Peltier în semiconductoare. Unora li se părea că această idee se sprijină pe o supraapreciere a semiconductoarelor, că ea nu poate fi justificată de considerații care se bazează pe un fond de fapte

riguroase și logice. Această neîncredere în ideea emisă s-a transformat însă repede în convingerea certă că ea poate fi realizată practic, convingere care a apărut după ce A. F. Ioffe a creat teoria instalațiilor termoelectrice cu semiconductoare și a demonstrat că, folosind în acest scop semiconductoare cu parametri electrici corespunzători, se poate rezolva cu succes problema propusă.

La baza construcției unei instalații termoelectrice cu semiconductoare se găsesc aceleași principii care se folosesc într-un termoelectrogenerator și anume funcțiunile principale ale unei asemenea instalații sînt îndeplinite de o baterie de termoelemente care este alcătuită în modul următor: din semiconductoare cu proprietățile termoelectrice necesare se confecționează diferite elemente, de exemplu de formă paralelipipedică. După aceea, un element cu mecanism de conducție electronic este conectat — cu ajutorul unei plăcuțe metalice — în serie cu un element care posedă conducție prin goluri. Acest element, la rîndul lui, se conectează cu un al treilea element, de data aceasta electronic; al treilea element se conectează cu un al patrulea, al patrulea cu al cincilea etc. Se realizează în felul acesta o conectare în serie de semiconductoare electronice și cu goluri, care alternează. Se obține o coloană alcătuită dintr-un număr oarecare de elemente (fig. 50). Din considerații pur constructive, mai multe coloane de acest fel se conectează în serie. Ca rezultat se obține o baterie formată dintr-un număr relativ mare de elemente (fig. 51).

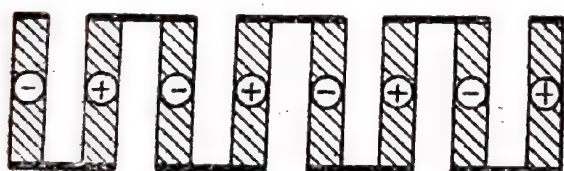


Fig. 50. Coloană refrigeratoare termoelectrică, alcătuită din elemente semiconductoare electronice și cu goluri care alternează unele cu altele

Menționăm totuși că nu totdeauna și nu în toate cazurile este necesară tocmai o baterie de acest fel, compusă dintr-un număr mare de elemente. Există, de exemplu, instalații de răcire care constau numai dintr-un singur termoelement.

Cînd prin baterie circulă un curent electric, un sistem de lipituri se răcește, pe cînd celălalt se încălzește. Dacă inversăm sensul curentului, primul sistem se va încălzi, iar cel de al doilea se va răci. După cum se va arăta în cele ce urmează, această proprietate a bateriei termoelectrice — dega-

jarea sau absorbirea de căldură în aceeași porțiune a ei, în funcție de sensul curentului — joacă un rol extrem de important.

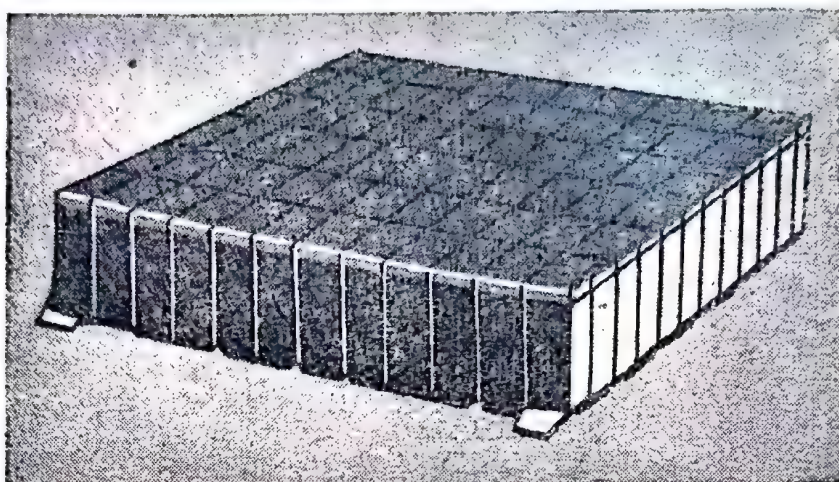


Fig. 51. Baterie de răcire termoelectrică

Parametrul esențial ce caracterizează eficacitatea unei baterii termoelectrice este coeficientul frigorific K , egal cu raportul dintre puterea termică Q_0 absorbită de lipiturile reci, și puterea electrică W necesară. Cu alte cuvinte, coeficientul K caracterizează rentabilitatea energetică a instalației care produce frig, adică în esență nu reprezintă altceva decât randamentul. Teoria elaborată de A. F. Ioffe arată că în cazul unei anumite diferențe de temperatură între lipiturile calde și cele reci, coeficientul K este determinat în întregime de mărimea

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\kappa}$$

unde α este coeficientul de forță termoelectromotoare, σ — conductivitatea electrică, iar κ — coeficientul de conductibilitate termică. La toate metalele, fără excepție, α are o valoare extrem de mică, iar κ — dimpotrivă — o valoare extrem de mare. De aici rezultă, evident, că coeficientul frigorific mare al instalației de răcire termoelectrice poate fi obținut numai dacă în acest scop se folosesc semiconductoare, nu metale. Se înțelege că pentru crearea unei instalații frigorifice termoelectrice eficace este necesar să se folosească numai substanțe semiconductoare la care coeficientul z are o valoare cât mai mare posibilă. Nivelul actual al tehnologiei fabricării substanțelor pentru termoelemente permite să se creeze ter-

mobaterii care, funcționând fără sarcină termică, realizează micșorarea temperaturii cu 60°C . Dacă lipiturile calde, de exemplu, se găsesc la temperatura camerei ($+20^{\circ}\text{C}$), temperatura lipiturilor reci — dacă se respectă anumite condiții — poate atinge — 40°C . În multe cazuri, micșorarea temperaturii cu 60°C este insuficientă și este necesară o răcire încă și mai puternică. Atunci trebuie să se recurgă la folosirea unei baterii cu mai multe etaje; din punct de vedere constructiv, aceasta se realizează în modul următor. Se confecționează mai multe baterii, să zicem trei. Fiecare baterie, din punct de vedere electric, este cu totul independentă și funcționează fără legătură cu celelalte. Apoi, aceste trei baterii se pun în contact una cu alta, în așa fel încât între ele să se creeze un contact termic cât mai bun posibil. Aceasta se poate realiza, de exemplu, în modul următor: toate cele trei baterii se așază una peste alta (fig. 52). Între ele se așază plăci despărțitoare subțiri care posedă proprietăți electroizolante bune, dar care — în același timp — conduc bine căldura. Prin acest procedeu, lipiturile reci ale primei baterii (cea de jos) răcesc lipiturile fierbinți ale celei de-a doua, iar lipiturile reci ale celei de-a doua baterii răcesc lipiturile calde ale celei de-a treia. Când prin fiecare dintre baterii trece un curent electric, căderea totală de temperatură a bateriei cu trei etaje se va compune din căderile de temperatură produse de fiecare baterie.

La prima privire s-ar părea că o mărire considerabilă a numărului de etaje ar putea duce la o micșorare însemnată a temperaturii lipiturilor reci ale ultimei baterii. Totuși, din nefericire, nu se întâmplă astfel, deoarece fiecare etaj următor produce o micșorare din ce în ce mai redusă a temperaturii. Pentru obținerea unor temperaturi mai scăzute este rațional să se folosească termobaterii cu maximum trei etaje.

Metoda termoelectrică de răcire prezintă o serie întreagă de avantaje. Unul dintre ele constă în posibilitatea realizării unei reglări line a temperaturii lipiturilor reci prin variația intensității curentului care trece prin termoelemente. O dată cu creșterea intensității curentului, cantitatea de căldură Q , absorbită de lipiturile reci din cauza efectului Peltier, se mărește și, în consecință, temperatura lor se micșorează; dimpotrivă, scăderea intensității curentului duce la egalizarea temperaturilor lipiturilor calde și reci. Prin urmare, alegând diferite valori ale intensității I a curentului, se pot obține diferite grade de răcire. Ce e drept, această posibili-

tate este limitată: mărind peste măsură intensitatea curentului, nu se poate obține totuși o răcire oricât de mare. Aceasta se explică prin faptul că pe lângă absorbirea și degajarea de căldură prin efect Peltier la lipiturile circuitului termoelectric, în acesta se degajă și căldură prin efect Joule. Cantitatea de căldură Q , provenită din efectul Peltier este proporțională cu prima putere a intensității I a curentului, adică $Q = Pit$, în timp ce cantitatea de căldură A — degajată prin efect Joule — este proporțională cu pătratul intensității curentului:

$$A = I^2 R t.$$

Pentru obținerea unei răciri maxime este necesar să se aleagă valoarea optimă I_{opt} a intensității curentului electric, care poate fi ușor calculată. Dacă prin baterie trece însă un curent mai mare ca valoare decât I_{opt} , gradul de răcire se va micșora, iar pentru $I \gg I_{opt}$ se va transforma în încălzire.

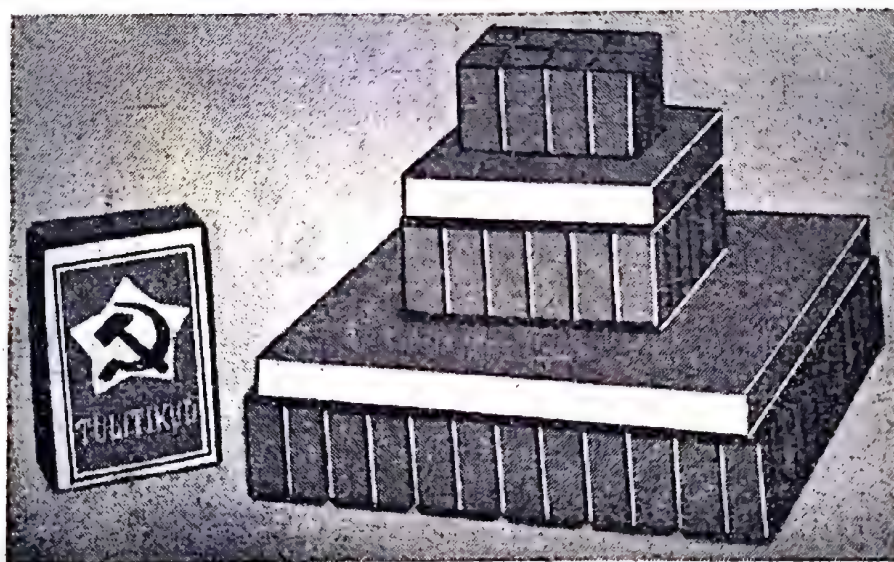


Fig. 52. Baterie termoelectrică cu trei etaje (la stînga, pentru comparație, o cutie de chibrituri)

Acestea sînt, foarte succint, principiile esențiale pe care se bazează construcția bateriilor de răcire termoelectrice.

Instalațiile frigorifice cu semiconductoare de-abia acum încep să-și facă drum în știință, în tehnică și în viața de toate zilele. Avantajele lor în comparație cu frigiderele obișnuite sînt atît de evidente, încît, într-un viitor nu prea îndepărtat, ele vor deține monopolul în toate domeniile unde se folosesc instalații frigorifice de putere mică.

Curînd după ce a fost elaborată tehnologia fabricării substanțelor semiconductoare cu proprietăți termoelectrice bune au fost întreprinse încercări de creare a unor frigider casnice cu semiconductoare. De rezolvarea acestei probleme s-au ocupat mai multe organizații, în frunte cu Institutul de semiconductoare din Leningrad al Academiei de Științe a U.R.S.S., care a creat mai multe tipuri de frigorifere casnice, destinate păstrării alimentelor. La baza fiecărei construcții se află unul și același principiu: toate lipiturile care se răcesc ale bateriei termoelectrice se amplasează în interiorul cavității frigiderului, iar lipiturile care se încălzesc sînt scoase în afară. Atît unul cît și celălalt sistem de lipituri sînt în contact cu niște radiatoare metalice. Radiatoarele legate direct la lipiturile reci ale termobateriei absorb căldura din spațiul interior al frigiderului. Radiatoarele legate la lipiturile calde sînt așezate pe partea exterioară a peretelui din spate al frigiderului și sînt destinate special să preia și să disipe căldură. În fig. 53 este arătat aspectul exterior al unui fri-

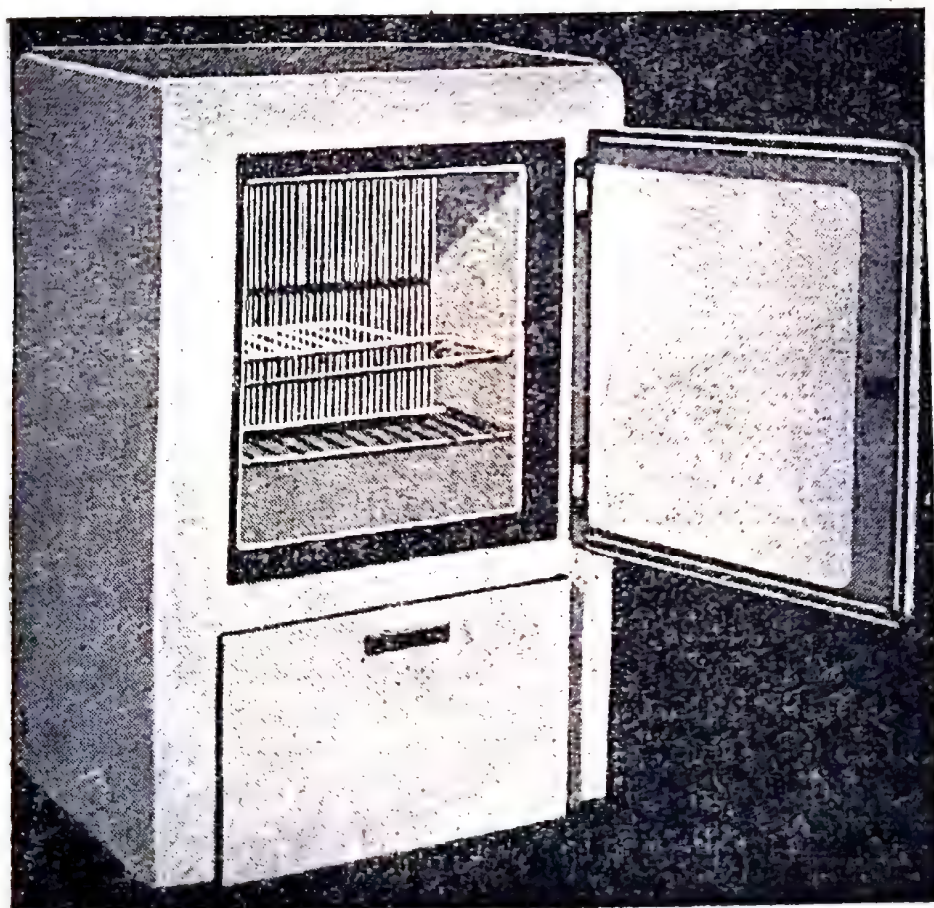


Fig. 53. Frigider casnic termoelectric. Înăuntrul dulapului se văd radiatoarele în contact cu lipiturile reci ale termobateriei

gider termoelectric cu capacitatea de 40 l, construit de Institutul de semiconductoare împreună cu Fabrica nr. 2 din Leningrad a Direcției Industrii Locale a Lengorispolkom. La același institut au fost realizate și alte construcții de frigider casnice. Dintre acestea trebuie menționată în mod deosebit construcția elaborată de inginerul A. N. Voronin (fig. 54). Ea se deosebește de alte construcții prin faptul că înseși elementele au forma unor discuri cu un orificiu la mijloc. Elementele sînt conectate în așa fel, încît toate orificiile să ajungă unul în dreptul celuilalt și, ca rezultat, în interiorul unei asemenea coloane se formează un canal. Toate generatoarele elementelor în formă de discuri constituie lipituri reci, iar lipiturile interioare sînt cele calde. Pentru preluarea căldurii, prin canal se face să circule apă curgătoare de la o conductă.

Această construcție a permis să se micșoreze considerabil cantitatea de substanțe semiconductoare, reducînd-o pînă la 150 g.

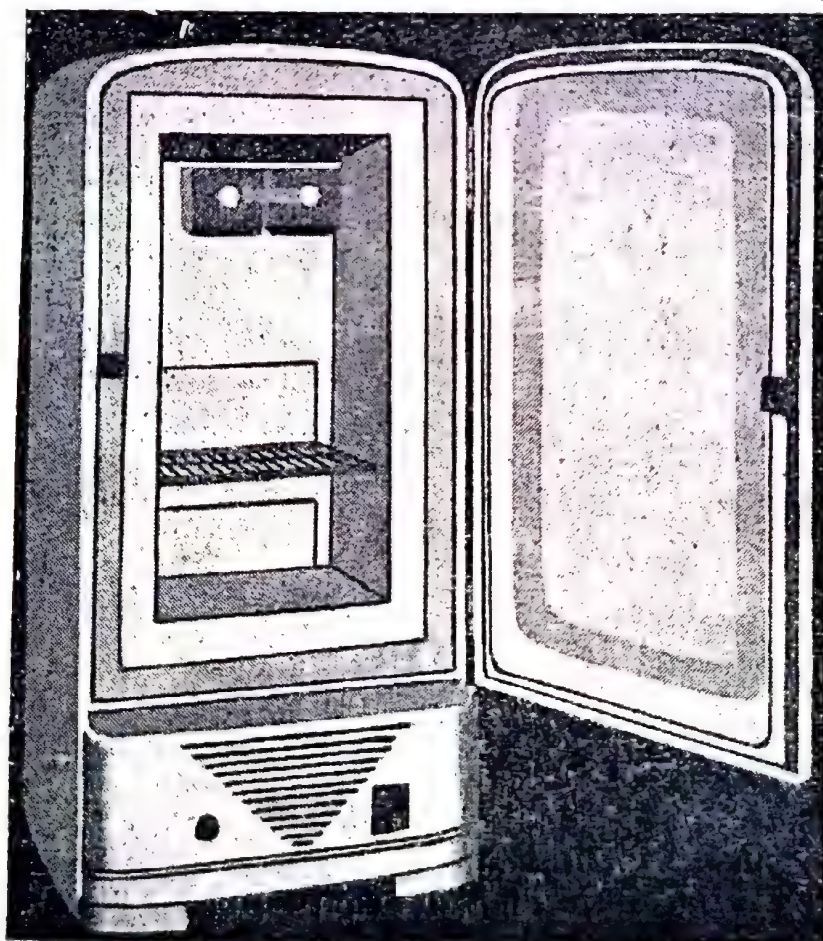


Fig. 54. Frigider cu semiconductoare, răcit cu apă

Care sînt avantajele frigiderelor termoelectrice în comparație cu cele obișnuite? Avantajele principale constau în faptul că, spre deosebire de instalațiile cu compresor, frigiderelor cu semiconductoare nu au nici un fel de piese mobile, se fabrică simplu și, în fine, ceea ce este principal, durata lor de serviciu este practic infinită. Termoelementelor cu semiconductoare care funcționează la temperaturi apropiate de temperatura camerei nu li se poate întîmpla nimic și dacă cu un asemenea frigider se procedează cu atenție, el va putea fi folosit foarte mult timp.

Proprietățile termoelectrice bune ale semiconductoarelor permit ca ele să fie folosite pentru crearea celor mai diverse tipuri de instalații frigorifice destinate păstrării produselor. Instalații de acest fel, de exemplu, pot fi amplasate la bordul autocisternelor care transportă lapte sau băuturi răcoritoare, în vagoanele frigorifere, la bordul vapoarelor, în elevatoare, la bordul avioanelor, pretutindeni unde este necesar frigul și unde există surse de curent continuu.

Spre deosebire de toate celelalte tipuri de instalații frigorifice, frigiderelor cu semiconductoare pot fi destul de mici în ce privește dimensiunile lor. Ultima împrejurare, în numeroase cazuri, are o importanță excepțională, permițînd să se rezolve radical multe probleme științifice și tehnice esențiale.

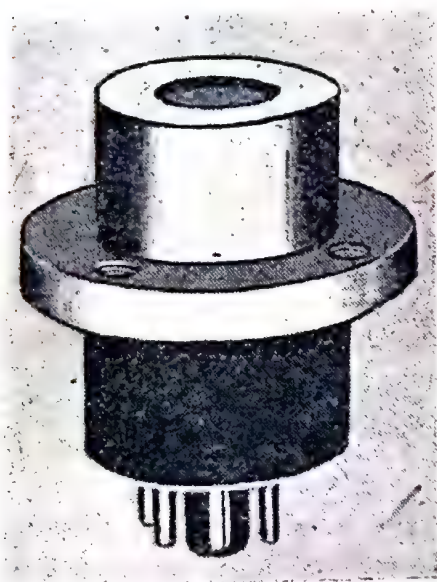


Fig. 55. Aspectul general al unui microfrigider pentru răcire și păstrarea la temperatură constantă a fotorezistențelor

Vom da cîteva exemple. Sensibilitatea anumitor fotorezistențe crește puternic o dată cu scăderea temperaturii lor. Dimensiunile fotorezistențelor nu sînt mari. În mod obișnuit suprafața lor fotosensibilă este mai mică decît un centimetru pătrat. Se înțelege că este excesiv de incomod și nerentabil să se răcească asemenea dispozitive mici prin procedeele obișnuite. Un microfrigider cu semiconductoare rezolvă însă această problemă cît se poate de simplu. Aici chiar cuvîntul „frigider” este prea pretențios, deoarece întregul aparat constă din maximum două termoelemente, la ale căror lipituri reci sînt așezate fotorezistențele (fig. 55).

Un rol important au în tehnică și multiplicatoarele fotoelectronice. În majoritatea domeniilor unde sînt folosite, multiplicatoarele fotoelectronice își îndeplinesc bine funcțiunile lor. În unele cazuri, însă, așa-numitul „zgomot de fond”, suprapus peste fotocurent, micșorează considerabil calitatea măsurărilor. Pentru micșorarea zgomotului de fond, catodul multiplicatorului fotoelectronic trebuie răcit cu cîteva zeci de grade. Aceasta se realizează în modul cel mai simplu și mai ușor cu ajutorul unui microfrigider cu semiconductoare (fig. 56). În acest caz el este confecționat sub forma unui cilindru metalic, pe fundul căruia sînt montate termoelemente cu semiconductoare. În interiorul cilindrului-frigider se amplasează multiplicatorul fotoelectronic. Catodul acestuia aderă relativ bine la fundul cilindrului, datorită cărui fapt se asigură micșorarea necesară a temperaturii catodului.

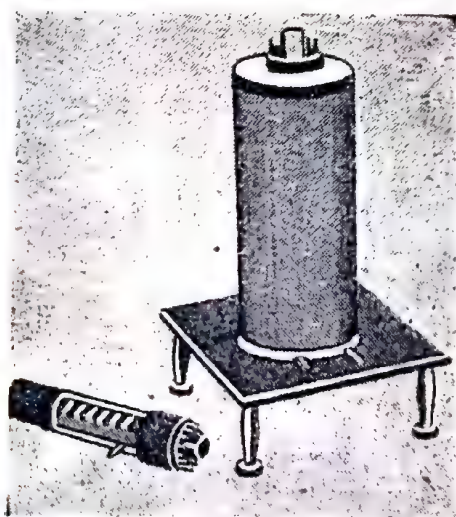


Fig. 56. Microfrigider pentru răcirea și păstrarea la temperaturi constante a multiplicatoarelor fotoelectronice (dreapta) și un multiplicator fotoelectronic (stînga)

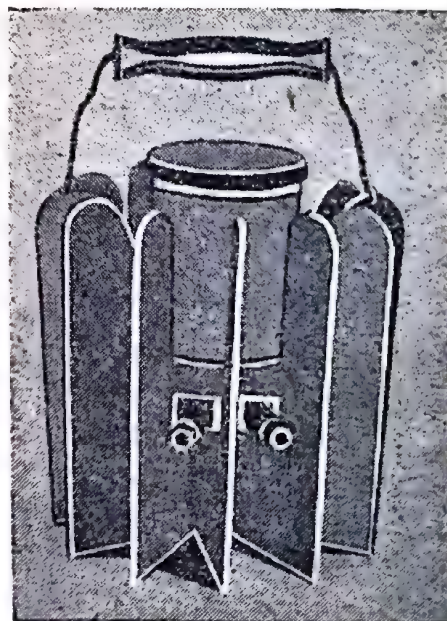


Fig. 57. Microfrigider pentru transportarea preparatelor biologice (una dintre primele variante)

Cu ajutorul microfrigiderelor se rezolvă o problemă atît de importantă cum este răcirea preparatelor biologice în timpul transportării lor cu mijloace neadaptate acestui scop: automobile, autobuze, vagoane de cale ferată obișnuite, carboturi etc.

Cînd apare necesitatea să se transporte dintr-un punct în altul, în timpul verii, un preparat oarecare, ușor alterabil, acesta trebuie răcit. În modul cel mai simplu și mai ușor, această operație se îndeplinește cu ajutorul unui microfrigider cu semiconductoare. În acest caz, microfrigiderul are forma unui cilindru metalic cu pereți dubli. Spațiul dintre pereți este umplut cu un material termoizolant. În interiorul cilindrului se introduce un recipient cu preparatul ce urmează a fi transportat. Termoelementele sînt montate pe fundul cilindrului. Frigiderul primește alimentarea necesară de la un acumulator. În timpul transportării cu automobile, se poate folosi acumulatorul propriu al automobilului. În fig. 57 este arătat un microfrigider pentru preparate biologice.

În practica cercetărilor histologice unul dintre cele mai importante aparate de laborator este microtomul, un aparat cu ajutorul căruia se pregătesc secțiuni subțiri de țesuturi vii. În U.R.S.S., microtomurile sînt fabricate de uzina de instrumente medicale din Harkov.

Pentru a face o secțiune subțire, cu grosimea de cîtiva microni, țesutul care se găsește pe măsuța microtomului trebuie înghețat. Gradul de înghețare este determinat de felul țesutului. Acest ultim fapt necesită o temperatură strict determinată și constantă. Atît supraînghețarea cît și subînghețarea duc la imposibilitatea obținerii unei secțiuni de bună calitate.

La sistemele de microtomuri existente, micșorarea temperaturii țesutului se realizează cu ajutorul unui balon cu bioxid de carbon, care se găsește la o presiune de 150 at. Bioxidul de carbon se aplică printr-un furtun special, care are un capăt legat la robinetul balonului, iar celălalt la cavitatea mică a microtomului. Pe capacul superior al cavității se așază țesutul. Ieșind din balon și intrînd în cavitatea-măsuță, bioxidul de carbon răcește țesutul, care este supraînghețat cu bună știință. După aceea, operatorul așteaptă un timp oarecare pînă cînd temperatura țesutului se mărește întrucîtva, pentru a face o secțiune de bună calitate. Momentul necesar este determinat prin pipăit, fără ajutorul unor aparate de măsurat. Se înțelege că alegerea momentului potrivit pentru efectuarea secțiunii este condiționat în special de experiența operatorului: un om de știință începător greșește adesea.

Din descrierea succintă a procedurii de înghețare a țesuturilor pe măsuța microtomului rezultă clar că acest procedeu

prezintă numeroase dezavantaje esențiale. În primul rând el este greoi, deoarece necesită existența obligatorie în laborator a unui balon greu de oțel, a cărui greutate este cu ceva mai mică decât 100 kg, și păstrarea în ordine a furtunului de durit și a reductorului. Este necesar ca balonul să fie umplut periodic cu bioxid de carbon, adică el trebuie să fie trimis la fabrică și adus din nou înapoi. Este cât se poate de evident că folosirea bioxidului de carbon devine deosebit de incomodă în condiții nestaționare, de exemplu în condiții de campanie, unde transportarea baloanelor cu bioxid de carbon este îngreuiată excesiv de mult din cauza distanțelor mari. La aceasta trebuie să se adauge că nu există pretutindeni fabrici care să producă bioxid de carbon și, din această cauză, în orașele mici — neindustriale — operațiile cu microtomul se efectuează printr-un procedeu încă și mai complicat decât înghețarea.

Al doilea dezavantaj, extrem de important, constă în faptul că înghețarea țesuturilor prin procedeul descris elimină posibilitatea reglării temperaturii, deși această operație este deosebit de necesară.

Dezavantajele menționate au dus la necesitatea de a se căuta metode de înghețare a țesuturilor care, pe de o parte, să fie simple și sigure, iar pe de altă parte, să permită asigurarea controlului și reglării temperaturii. O asemenea construcție de microtom cu masuță frigorifică a fost realizată la Institutul de semiconductoare din Leningrad al Academiei de Științe a U.R.S.S.

Răcirea se realizează cu ajutorul unei baterii termoelectrice semiconductoare, de dimensiuni mici, compusă din numai patru termoelemente. Bateria este amplasată direct pe masuță și anume în așa fel, încât lipiturile care se răcesc sînt îndreptate înspre exterior, iar cele care se încălzesc — înspre interior. La conectarea termoelementelor într-un circuit de curent continuu, lipiturile exterioare încep să se răcească. Reglînd intensitatea curentului electric se poate obține un grad diferit de răcire a lipiturilor, prin urmare și a țesuturilor care se așază direct pe ele. Pe suprafața masuței se fixează, în caz de necesitate, un microtermistor semiconductor, în formă de sferă, care permite să se măsoare temperatura cu un mare grad de precizie. Gradul de răcire necesar pentru țesut se obține după trecerea a 4—5 minute de la aplicarea curentului electric.

În condițiile staționare din spitale, clinici sau institute de cercetări științifice, alimentarea măsuței frigorifice a microtomului poate fi realizată de la o rețea de iluminat obișnuită, prin intermediul unui redresor cu seleniu tipic, de marca BCA-10. În condiții de campanie sau în localitățile neelectrificate, energia electrică poate fi obținută de la orice acumulator de automobil. Puterea absorbită de măsuță nu este mare și în cazul unei intensități de circa 10 A a curentului are o valoare de numai 2 W. Durata de serviciu a bateriei însăși este practic nelimitată și dacă ea nu este expusă unor deteriorări mecanice nu trebuie schimbată niciodată.

Microtomul cu măsuță răcită pe cale termoelectrică permite să se facă secțiuni cu grosimea pînă la 2 μ .

Măsuța de răcire este realizată constructiv în așa fel, încît ea să poată fi montată pe un microtom obișnuit, de felul celor confecționate la fabrica de instrumente medicale din Harkov, demontînd în prealabil de la acesta măsuța răcită cu bioxid de carbon. În fig. 58 este reprezentat aspectul general al unui asemenea microtom cu măsuță răcită termoelectric.

Microtomul a trecut cu succes prin diferite încercări, în timpul cărora au ieșit în evidență calitățile lui.

În practica cercetărilor microscopice apare adesea necesitatea de a se studia obiecte care se găsesc în diferite condiții de temperatură. Cum să se rezolve o astfel de problemă? Metodele obișnuite permit relativ simplu să se mărească temperatura preparatului, însă în ce privește răcirea lui, aceasta se realizează cu prețul folosirii unor mijloace voluminoase și puțin comode. Folosirea în acest scop a termoelementelor cu semiconductoare a simplificat în mare măsură problema și a dat posibilitatea să se construiască și să se realizeze o măsuță de microscop cu încălzire și răcire termoelectrică. Ideea acestei construcții se bazează pe faptul că, în funcție de sensul curentului electric care trece printr-un circuit format din

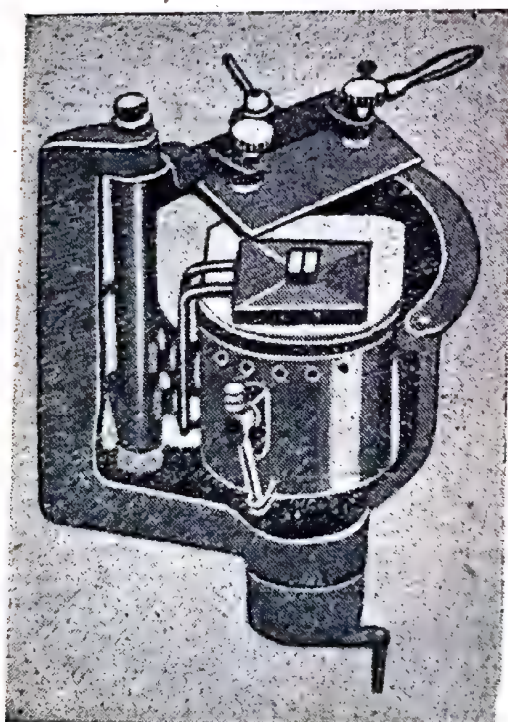


Fig. 58 Microtom cu măsuță răcită termoelectric

termoelemente, sistemul de lipituri respectiv sau se răcește, sau — dimpotrivă — se încălzește.

Formatul constructiv al măsuței pentru microscop este arătat în fig. 59. Măsuța este confecționată în așa fel, încât ea să poată fi montată la orice tip de microscop. La mijlocul măsuței, așa cum se arată în fig. 59, s-a răcut un orificiu pentru ca preparatul să poată fi examinat nu numai în lumină reflectată, dar și prin transparență.

Pentru a se micșora temperatura preparatului sau, invers, pentru a o putea mări, este necesar să se inverseze sensul curentului care circulă prin termoelemente, cu ajutorul unui comutator special. Reglând intensitatea curentului, se pot obține diferite temperaturi între limitele de la -10 până la $+70^{\circ}\text{C}$.

Măsuța absoarbe în total numai o energie electrică de 2 W la un curent de 12 A . Diametrul ei este de 80 mm , iar înălțimea — de 10 mm .

Metoda termoelectrică de „producere” a frigului și-a găsit aplicații și în scopuri meteorologice. Vom da numai un singur exemplu: Institutul de semiconductoare, împreună cu Observatorul geofizic principal A. I. Voeikov, a proiectat și construit un higrometru termoelectric. Principiul de funcționare al acestui aparat se bazează pe faptul că un termoelement răcește o oglindă mică pe care cade — de la un corp de iluminat special — un fascicul îngust de lumină, reflectat apoi pe suprafața unei celule fotoelectrice. Într-un moment oarecare, când temperatura oglinjoarei se va micșora în mod corespunzător, pe suprafața ei vor apărea vapori condensati, ea va deveni neclară și intensitatea fasciculului luminos reflectat se va micșora considerabil, fapt care va fi perceput practic instantaneu de circuitul celulei fotoelectrice. Temperatura suprafeței oglinjoarei se măsoară cu un termocuplu special cu semiconductoare. Aparatul corespunzător este etalonat direct în unități de conținut de umiditate. În fig. 60 este arătat aspectul exterior al higrometrului de condensare.

La Institutul de semiconductoare au fost imaginate încă o serie întreagă de alte tipuri de microfrigidere destinate a fi folosite în cele mai diferite domenii ale științei și tehnicii.

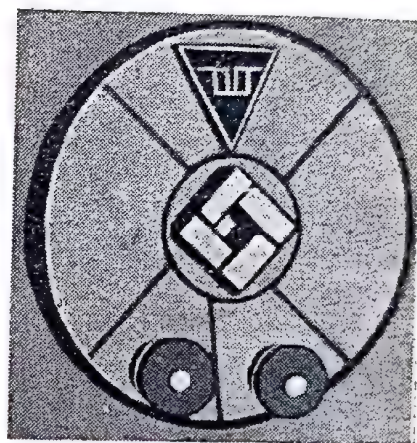


Fig. 59. Măsuță pentru microscop cu încălzire și răcire termoelectrică

Reversibilitatea efectului Peltier a permis să se rezolve, cu ajutorul microfrigiderele, încă o problemă interesantă și extrem de importantă. Se știe că înlocuitorile tuburilor

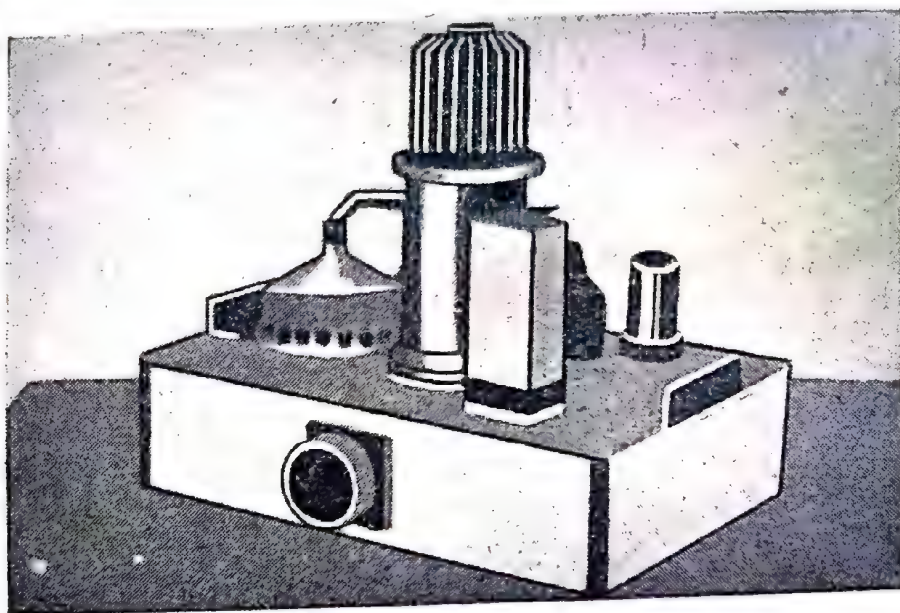


Fig. 60. Higrometru cu condensare

electronice — diodele semiconductoare și tranzistoarele cu germaniu — funcționează sigur numai într-un interval de temperaturi determinat; de la -50°C până la $+60^{\circ}\text{C}$. Sub -50°C și peste $+60^{\circ}\text{C}$ parametrii lor se înrăutățesc brusc. Referitor la această particularitate a dispozitivelor cu germaniu, apare necesitatea păstrării lor la o temperatură constantă, ceea ce se realizează menținând într-un anumit volum o temperatură strict constantă în cazul unor variații de temperatură considerabile ale mediului înconjurător, într-un sens sau în celălalt. Dacă în volumul unde se găsește instalația radiotehnică cu dispozitive cu germaniu este necesar să se mențină o temperatură care depășește temperatura mediului ambiant, aceasta se realizează suficient de simplu prin intermediul unor sisteme termoregulatorie obișnuite. În cazul când este însă necesar să se asigure o temperatură constantă cu condiția că temperatura mediului înconjurător poate fi sau mai mare, sau mai mică decât temperatura dată a volumului, nici unul dintre sistemele existente nu pot rezolva această problemă pe o cale simplă și ușoară. Soluția cea mai rațională constă în folosirea metodei termoelectrice.

La Institutul de semiconductoare au fost elaborate mai multe tipuri de asemenea aparate, care asigură o temperatură constantă pentru variații care ajung pînă la 50°C ale temperaturii mediului ambiant.

Termostatul cu semiconductoare (fig. 61) se deosebește în principiu puțin de construcția unui microfrigidier. Se adaugă numai un singur element nou, un termoregulator, care — în funcție de temperatura volumului și prin intermediul unui relee — inversează sensul curentului în termobaterie; datorită acestui fapt, volumul său se încălzește, sau — dimpotrivă — se răcește.

Acest procedeu permite să se mențină în termostat

o temperatură constantă cu eroarea pînă la o sutime de grad, ceea ce dă posibilitatea să se utilizeze instalații termoelectrice pentru păstrarea oricăror obiecte, la temperatură constantă, inclusiv cristale de cuarț pentru stabilizarea frecvenței, care necesită o temperatură riguros constantă.

În instalațiile de vid moderne, în cavitatea vidată se obține o rarefiere înaintată a aerului prin funcționarea simultană a două tipuri de pompe: una pentru vid preliminar, și alta pentru vid înaintat, și prin folosirea obligatorie a unor dispozitive speciale, care au căpătat denumirea de capcane. Pompa de vid înaintat, cu jet de vaporii de ulei, intră în funcțiune atunci cînd s-a creat deja un vid preliminar de ordinul a 10^{-3} mm Hg. După ce s-a obținut rarefierea preliminară necesară, se pune în funcțiune pompa de vid înaintat, care funcționează cu un ulei special. Prin funcționarea simultană a acestor două pompe se poate obține în cavitate vidul necesar. Gradul de rarefiere înaltă, dacă în sistem nu există scurgeri, este însă limitat de o serie întreagă de factori, în special de presiunea vaporilor de ulei. Cele mai bune sorturi de ulei pentru vid înaintat au, la temperatura camerei, o presiune a vaporilor de circa 10^{-7} mm Hg. Uleiurile obișnuite folosite în pompele metalice cu jet de vaporii, de fabricație sovietică, posedă o valoare a presiunii vaporilor de cel

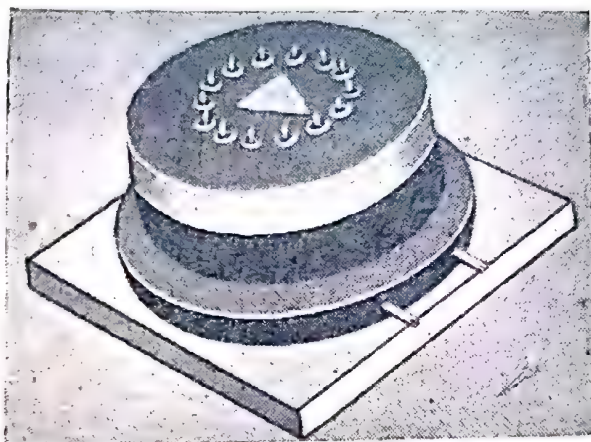


Fig. 61. Microtermostat pentru diodele și tranzistoarele de germaniu

puțin 10 ori mai mare. Obținerea unui vid mai înaintat decât presiunea indicată a vaporilor de ulei necesită din această cauză folosirea unor capcane care împiedică pătrunderea vaporilor de ulei în volumul vidat. Există diferite tipuri de capcane, a căror construcție se bazează pe diverse principii. Cea mai largă răspîndire au căpătat-o însă capcanele cu răcire. În aceste capcane, confecționate sub forma unor recipiente cu pereți dubli se toarnă aer lichid, oxigen lichid sau azot lichid, datorită cărui fapt pereții capcanei capătă o temperatură extrem de scăzută. Capcana se conectează în circuitul sistemului de vidare și se așază între cavitatea supusă vidării și pompa de vid înaintat. De aceea, când vaporii de ulei migratori ajung la peretele capcanei, ei se condensează și, în consecință, nu pătrund în spațiul care trebuie vidat.

Ideea pe care se bazează construcția capcanelor este simplă și acestea funcționează sigur. Totuși, pe lângă avantajele evidente ale unor asemenea aparate, ele au și unele lipsuri. Astfel, de exemplu, când se lucrează cu pompe de vid preliminar cu ulei, confecționate din sticlă, nu se recomandă ca să se toarne în capcane oxigen lichid sau aer lichid, deoarece acest fapt prezintă anumite pericole. Dacă, dintr-o cauză oarecare, capcanele se fisurează și oxigenul se amestecă cu uleiul, are loc o explozie. În plus, nu întotdeauna și pretutindeni pot sta la dispoziție lichidele menționate.

Capcana cu răcire termoelectrică, realizată la Institutul de semiconductoare este în mare măsură lipsită de aceste dezavantaje.

Constructiv, capcana termoelectrică este confecționată sub forma unei monturi metalice cilindrice, care — cu ajutorul a două flanșe și al unor garnituri de plumb — se racordează la pompă și la cavitatea supusă vidării. Aspectul general al capcanei este arătat în fig. 62, *a*.

Elementul principal care asigură crearea unei temperaturi scăzute este o baterie termoelectrică ale cărei lipituri reci vin în contact cu plăcuțele de condensare, iar lipiturile calde vin în legătură cu carcasa capcanei (fig. 62, *b*). După cum rezultă din fig. 62, carcasa — prin urmare și lipiturile calde ale termobateriei — sînt răcite cu apă curgătoare care circulă printr-o cămașă. Plăcuțele, în număr de 13, sînt așezate înclinat, cu scopul ca moleculele migratoare ale vaporilor de ulei să sufere o reflexie multiplă, înainte ca o parte oarecare din ele — neînsemnată — să reușească să pătrundă în cavitatea supusă vidării. Prin intermediul bateriei cu semicon-

ductoare, temperatura plăcuțelor este micșorată pînă la aproximativ -30°C dacă temperatura aerului înconjurător este de circa 20°C .

Combinarea temperaturii relativ scăzute a ecranelor cu amplasarea lor spațială, care condiționează o reflexie și o condensare eficace a vaporilor de ulei, face ca migrarea lor în cavitatea supusă vidării să se micșoreze considerabil, prin urmare se mărește în mod corespunzător gradul de rarefiere.

Pentru a se micșora temperatura ecranelor pînă la valoarea necesară, trebuie ca prin bateria termoelectrică să treacă un curent continuu cu intensitatea de 10—12 A, la o tensiune de 0,6—0,8 V. Prin urmare, pentru alimentarea ei, bateria absoarbe o putere de circa 10 W. Dacă în laborator nu există o sursă de curent continuu, se poate folosi un redresor standard cu seleniu, de tip BCA-10.

Se înțelege de la sine că în acest paragraf nu au fost descrise nici pe departe toate tipurile și construcțiile de instalații frigorifice cu semiconductoare, ale căror proprietăți remarcabile au fost deja confirmate de însăși practica.

15. INCALZIREA TERMoeLECTRICA

În cazul efectului Peltier, la trecerea curentului printr-un sistem de elemente semiconductoare neomogene, unele lipituri se răcesc, în timp ce altele se încălzesc. Această proprietate importantă, după cum am văzut, poate fi folosită cu succes pentru obținerea pe cale termoelectrică a frigului. Pe de altă parte, prin intermediul aceluiași efect Peltier se poate dobîndi căldură în locul frigului. În adevăr, dacă o baterie termoelectrică se construiește în așa fel încît lipiturile care se încălzesc să fie introduse în interiorul unei încăperi, iar cele care se răcesc să fie scoase în exterior, în timpul trecerii unui curent continuu prin acest sistem, încăperea se va

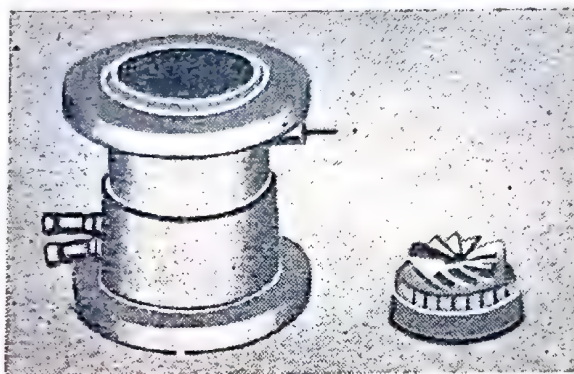


Fig. 62. Capcană termoelectrică pentru instalații de vid înaintat:

a — aspectul general al capcanei, *b* — baterie termoelectrică cu plăcuțe reflectoare care se înșurubează în capcană

încălzi pe seama energiei termice a aerului exterior, adică prin răcirea „străzii”.

La prima luare de contact cu această idee s-ar putea crede că ea prezintă interes numai pentru autorul unei povestiri sau al unui roman științifico-fantastic și că nu are nici o valoare științifică și cu atât mai mult practică. Sînt adevărate oare aceste păreri? Firește, nu sînt adevărate. Ideea remarcabilă a folosirii efectului Peltier pentru încălzirea încăperilor, emisă pentru prima dată de academicianul A. F. Ioffe, se bazează pe legile riguroase ale termodinamicii. A. F. Ioffe și-a dezvoltat ideea într-o teorie pe care a expus-o în cartea „Bazele energetice ale bateriilor termoelectrice din semiconductoare”.

Pentru a ilustra cît este de rațională utilizarea efectului Peltier pentru încălzirea încăperilor, vom face cîteva calcule extrem de elementare. Pentru simplificare să exami-

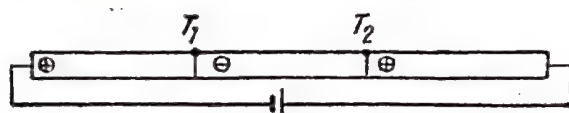


Fig. 63. Circuit termoelectric alcătuit din trei elemente semiconductoare: cu goluri, electronic și din nou cu goluri

năm un circuit alcătuit din trei bare semiconductoare: una cu goluri, una electronică și iarăși una cu goluri, conectate în serie (fig. 63).

Pentru un sens oarecare al curentului, temperatura pri-

mei lipituri va fi T_1 , iar a celei de-a doua T_2 . Fie $T_1 > T_2$. La trecerea curentului prin acest sistem, în prima lipitură se degajează o cantitate oarecare Q_1 de energie termică, iar de la cea de-a doua lipitură se ia o cantitate oarecare Q_2 de energie termică. Q_1 și Q_2 nu sînt egale una cu alta. Această inegalitate este condiționată de faptul că căldura rezultată din efectul Peltier este proporțională cu temperatura absolută a lipiturii. De aceea, $Q_1 > Q_2$.

În consecință, în lipitura caldă se degajează $Q_1 - Q_2 = P$ mai multă căldură decît se preia de la lipitura rece. Acest surplus de energie P apare din cauza energiei electrice a curentului.

Din însuși sensul procesului reiese că $P < Q_1$ în raportul

$$\frac{P}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

Însă

$$Q_1 = A T_1$$

și

$$Q_2 = AT_2,$$

unde A este un coeficient de proporționalitate. În acest caz

$$Q_1 - Q_2 = A(T_1 - T_2).$$

Împărțind partea stângă a ultimei expresii cu Q_1 , iar pe cea dreaptă — cu AT_1 , vom obține:

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

În consecință,

$$\frac{P}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Să înlocuim în această expresie câteva cifre concrete. Să presupunem că temperatura lipiturii calde este $T_1 = 290^\circ\text{K}$, iar temperatura lipiturii reci $T_2 = 260^\circ\text{K}$. Atunci $P/Q_1 \approx 1/10$. Aceasta înseamnă că la o temperatură de 17°C (290°K) a încăperii, numai $1/10$ din energia termică degajată la lipitură va fi furnizată de curentul electric, în timp ce $9/10$ din energie va proveni din rezervele de căldură ale aerului rece din exterior. Din aceste calcule absolut elementare, rezultă clar că încălzirea termoelectrică a unei încăperi reprezintă un sistem avantajos din punct de vedere economic. Ce e drept, în toate aceste calcule este necesar să se introducă o corecție considerabilă, deoarece ele se bazează pe ipoteza că toate fenomenele fizice din încălzitorul termoelectric sînt reversibile. De fapt, însă, în natură nu există procese reversibile și fiecare proces este însoțit de pierderi de neînlocuit. Dar, chiar dacă s-ar ține seama de toate pierderile ireversibile care au loc într-o baterie termoelectrică, totuși din punctul de vedere al economiei de energie absorbită, încălzirea încăperilor cu ajutorul semiconductoarelor prezintă un interes neîndoielnic.

Toate acestea au însă și un alt aspect. La inversarea sensului curentului electric, lipiturile interioare se vor încălzi, iar cele exterioare se vor răci. Prin urmare, bateria de semiconductoare va permite să se regleze temperatura încăperii în modul care este cel mai de dorit și mai comod. Cu ajutorul ei, în zilele calde de vară vom putea produce răcoare în camerele noastre, iar iarna le vom putea încălzi.

Apar însă imediat următoarele întrebări cu totul legitime : ce sens au toate acestea ? Nu este oare mai simplu să se încălzească încăperea prin metodele anterioare ? Ce avantaje posedă această nouă metodă ?

Toate aceste probleme, precum și altele care pot apărea, se bazează în esență pe sensul fizic al încălzirii termoelectrice, care constă în următoarele : consumînd o cantitate de energie electrică de cîțiva kilowați-ore, semiconductoarele permit să se realizeze un proces datorită căruia în încăpere sosește o cantitate de energie termică de cîteva ori mai mare, extrasă din rezervele de căldură ale aerului rece exterior. De aici trebuie să rezulte clar că încălzirea termoelectrică este excepțional de avantajoasă din punct de vedere economic, „randamentul” unei asemenea instalații depășind 100 %. Cuvîntul randament l-am pus în ghilimele pentru ca în mintea cititorului să nu se ivească o confuzie. Este vorba aici nu despre randamentul în sensul obișnuit al cuvîntului, care reprezintă raportul dintre puterea obținută și cea absorbită și care niciodată nu poate fi mai mare decît 100 %. Aici este vorba despre eficacitatea procesului de „pompare” a energiei termice a aerului înconjurător, prin absorbirea unei cantități mai mici de energie electrică. După cum se știe, energia termică prin ea însăși nu poate trece de la un corp mai puțin încălzit la altul mai încălzit. Pentru ca să fie totuși posibilă această trecere, este necesar să se creeze o instalație specială și să se absoarbă o cantitate oarecare de energie. Și iată că această instalație este tocmai bateria din elemente semiconductoare electronice și cu goluri, conectate în serie. Natural, se pot crea și alte instalații, alcătuite conform unui principiu absolut diferit, și care de asemenea să „transfere” energia termică de la un corp rece la unul cald, dar în cazul concret examinat vorbim numai despre folosirea în acest scop a efectului Peltier și a bateriei termoelectrice cu semiconductoare.

Au fost create în prezent baterii de acest fel ? Deocamdată, încă nu. Nivelul actual al tehnologiei semiconductoarelor permite pentru moment să se creeze numai instalații frigorifice care funcționează sigur, dar nu dă încă posibilitatea să se obțină termoelemente cu caracteristicile termotehnice necesare. Fizicienii, chimiștii și termotehnicienii trebuie să se mai străduiască încă foarte mult înainte de a-și atinge scopul propus. A. F. Ioffe a încercat să privească înainte și să apre-

cieze rolul semiconductoarelor în progresul tehnic. Abordînd problemele termoelectricității el a scris următoarele în unul din articolele sale: „Acum 25 ani semiconductoarele au pătruns pentru prima dată în electrotehnică împreună cu metalele. Atunci, la începutul primului cincinal, am emis ipoteza că termoelementele din semiconductoare sînt capabile să transforme 3—4% din energia termică direct în energie electrică și că sistemul socialist de economie națională va crea condițiile necesare pentru aceasta.

Multora, aceasta li s-a părut atunci ceva fantastic. Chiar unele ziare au avut o atitudine sceptică. În prezent, aceste așteptări au fost deja depășite de practică și aș dori să schițez etapa ulterioară a pătrunderii semiconductoarelor în viața noastră de toate zilele și în economia noastră națională.

Să ne închipuim că trăim peste cîțiva ani, sau chiar peste unul, două decenii și vom vedea că termoelementele semiconductoare alimentează industria cu energie electrică, obținută fără intermediul mașinilor, direct de la căldura unui focar. Încălzirea centrală a clădirilor noastre va furniza suplimentar, fără cheltuieli, energia electrică în cantități care vor asigura energia electrică necesară tuturor nevoilor casnice.

Ulterior, încălzirea centrală va ceda locul bateriilor termoelectrice, care vor produce aer cald în timpul iernii și aer rece în timpul verii, menținînd automat temperatura din încăperi la nivelul dorit.

Toate tipurile de mijloace de transport, trenuri, automobile, vapoare, poate și avioanele, vor fi alimentate cu energie electrică obținută de la termoelemente.

Ideea lui Mendeleev referitoare la gazeificarea subterană își va găsi rezolvarea naturală cu ajutorul termoelementelor.

Aceleași termoelemente semiconductoare vor crea frigul și în frigiderele casnice, la transportul și păstrarea produselor ușor alterabile etc.

Pretutindeni unde există în natură sau în producție surse de căldură, ele vor produce energie electrică. Peste tot unde există energie electrică se va putea crea căldură sau frig și va fi posibil să se realizeze orice procese de producție. Va sosi epoca electrificării totale la orașe și sate. Producerea de energie electrică nu va necesita mașini complicate și costisitoare“.

INCHIEIERE

În capitolele precedente ale acestei cărți s-a arătat într-o oarecare măsură rolul semiconductoarelor în știința și tehnica modernă. Nu se poate să nu menționăm însă că tema principală a acestei cărți nu a fost de loc epuizată în întregime; rolul și locul semiconductoarelor în viața noastră de toate zilele sînt fără îndoială mai însemnate. Că exemplu se poate arăta că în tehnică se folosesc pe scară largă așa-numitele materiale seignetto-electrice, substanțe semiconductoare cu constantă dielectrică mare, a cărei valoare ajunge pînă la cîteva mii.

Descoperirea de către fizicianul sovietic B. M. Vul a proprietăților seignetto-electrice ale titanului de bariu au extins încă și mai mult posibilitățile materialelor seignetto-electrice folosite pentru fabricarea condensatoarelor care posedă o capacitate considerabilă și au dimensiuni mici.

O importanță tot așa de mare pentru tehnică au materialele piezoelectrice, cristale semiconductoare care posedă proprietăți remarcabile. Dacă un cristal piezoelectric este comprimat sau alungit, pe fațetele lui vor apărea sarcini electrice de semne opuse. Dimpotrivă, dacă cristallul piezoelectric este așezat într-un câmp electric exterior, el se va deforma. Prin urmare, în anumite condiții, un material piezoelectric permite să se realizeze transformarea energiei mecanice direct în energie electrică și a energiei electrice în energie mecanică. Materialele piezoelectrice au căpătat numeroase aplicații. Pe baza lor se construiesc instalații cu ultrasunete care generează și recepționează unde ultrasonore. Un cristal piezoelectric de dimensiuni mici servește drept element principal în dozele de picup piezoelectrice, în difuzoare, în defectoscoape cu ultrasunete etc.

În multe aparate electronice cu vid, una dintre piesele principale este catodul care se găsește la un potențial negativ și emite electroni care sînt apoi accelerați de un câmp electric. Pentru ca să emită electroni, catodul trebuie să fie incandescent. De temperatura catodului depinde intensitatea fasciculului de electroni. Este extrem de important ca la intensitatea

dată a fasciculului de electroni să se poată micșora temperatura catodului cât mai mult posibil. În primul rînd, aceasta duce la creșterea randamentului întregului aparat, deoarece se micșorează puterea absorbită pentru încălzire. În al doilea rînd, durata de serviciu a catodului se lungeste. Acest scop este atins acoperind suprafața catodului metalic cu un strat subțire semiconductor, datorită căruia lucrul de ieșire al electronilor din metal se micșorează și catodul poate emite numărul necesar de electroni chiar la o temperatură mai scăzută.

Transmiterea energiei electrice de înaltă frecvență se realizează prin intermediul ghidurilor de unde care sînt niște conducte metalice. Pentru măsurarea puterii transmise se folosesc atenuatoare, numite altfel și dispozitive absorbante. După cum arată și denumirea lor, dispozitivele absorbante absorb parțial sau chiar în întregime puterea incidentă. Această funcțiune importantă, după cum s-a observat, poate fi îndeplinită numai de atenuatoare confecționate din substanțe semiconductoare speciale.

În unele cazuri, în tehnică se folosesc redresoare de curent cu ignitroane; unul dintre elementele componente principale ale unui ignitron este electrodul de aprindere care pune în funcțiune tubul. Pentru ca un asemenea tub redresor să poată funcționa, este necesar ca electrodul de aprindere (igniterul) să fie făcut dintr-un material semiconductor. În mod obișnuit, se folosește în acest scop carbură de bor sau carbură de siliciu cu diferite adaosuri.

Pentru măsurarea tensiunilor mecanice se utilizează diferite dispozitive, însă toate au anumite dezavantaje. De aceea, în unele cazuri este rațional ca pentru scopul amintit să se folosească tensometre cu semiconductoare, care reprezintă rezistențe de volum cuprinse între doi electrozi purtători de curent. În cazul unei variații a sarcinii, rezistența tensometrului se modifică și variația este înregistrată de un aparat de măsurat electric corespunzător.

Un rol aparte joacă semiconductoarele în industria chimică, unde ele sînt folosite drept catalizatori pentru multe reacții chimice. Nu este întîmplător faptul că foarte recent a apărut o nouă ramură independentă a chimiei fizicale: cataliza prin intermediul semiconductoarelor.

Pe măsura dezvoltării celor mai diverse ramuri științifice și tehnice devine din ce în ce mai necesară introducerea fie a materialelor semiconductoare, fie a aparatelor cu semiconductoare. Această necesitate apare datorită faptului că semi-

conductoarele nu numai că simplifică rezolvarea unei probleme oarecare, dar în unele cazuri soluționarea unei anumite probleme este posibilă numai cu ajutorul lor. Dacă în prezent, la nivelul actual al tehnicii, putem vorbi cu deplină certitudine despre perspectivele colosale ale electronicii semiconductoarelor, acest fapt este cu atât mai justificat, cu cât și știința despre semiconductoare nu rămîne pe loc, ci progresează neîncetat. Se perfecționează metodele de cercetare, apar noi idei, se descoperă noi fapte experimentale și se fac noi descoperiri. Analiza cea mai moderată și mai prudentă, bazată pe realizările care există deja în prezent, permite să se prevadă cu tărie progresul rapid al cunoștințelor noastre ulterioare, mai profunde, despre semiconductoare. Pătrunzînd din ce în ce mai adînc în tainele proprietăților materiei, cercetătorii învață să le stăpînească pe deplin și se apropie din ce în ce mai repede de țelurile propuse.

BIBLIOGRAFIE

- А. Ф. Иоффе. Полупроводники и их применение, Изд-во Акад. наук СССР, 1956.
- А. Ф. Иоффе. Полупроводники и их применение, Изд-во «Знание», 1956.
- Э. И. Адирович. Электрическое сопротивление твердых тел, Изд-во «Знание», 1953.
- Б. М. Бул. Сегнетоэлектричество, Изд-во Акад. наук СССР, 1956.
- М. С. Соминский. Полупроводники и их применение, Госэнергоиздат, 1955.
- М. С. Соминский. Полупроводники, Изд. ЛДНТП, 1957.
- Н. Я. Пумпер. Присталические диоды и триоды, Госэнергоиздат, 1953.
- А. Ф. Иоффе. Физика полупроводников, Изд-во Акад. наук СССР, 1957.
- А. Ф. Иоффе. Полупроводниковые термоэлементы, Изд-во Акад. наук СССР, 1956.
- А. Ф. Иоффе, Л. С. Стильбанс, Е. К. Иорданишвили, Т. С. Ставицкая. Термоэлектрическое охлаждение, Изд-во Акад. наук СССР, 1956. странной литературы, 1956.
- А. Кобленц и Г. Оуэнс. Транзисторы, Теория и применения, Изд-во ино-ЛДНТП, 1956.
- Ф. Ф. Волькенштейн. Полупроводники как катализаторы химических реакций, Изд. ЛДНТП, 1956.
- И. Х. Геллер и С. С. Мескин. Полупроводниковые выпрямители, Изд. ЛДНТП, 1957.
- Д. Н. Мирлин. Полупроводниковые болометры, Изд. ЛДНТП, 1957.
- А. Г. Остроумов. Пьезоэлектрики, Изд. ЛДНТП, 1957.
- В. П. Жузе и А. Р. Регель. Технические применения эффекта Холла. Изд. ЛДНТП, 1957.
- М. С. Соминский. Вентильные фотоэлементы, Изд. ЛДНТП, 1957.
- Г. А. Смоленский и В. А. Исупов. Сегнетоэлектрики, Изд. ЛДНТП, 1957.
- В. К. Субашиев. Фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии, Изд. ЛДНТП, 1957.
- В. К. Субашиев. Кристаллические диоды и триоды, Изд. ЛДНТП, 1957.
- М. С. Соминский. Фотосопротивления, Изд. ЛДНТП, 1957.
- С. С. Шалыт. Электрические свойства полупроводников. Изд. ЛДНТП, 1957.
- И. Т. Шефтель. Термосопротивления, Изд. ЛДНТП, 1957.
- Полупроводники в науке и технике, под редакцией акад. А. Ф. Иоффе, т. I, Изд-во Акад. наук СССР, 1957.
- Г. А. Смоленский и А. Г. Гуревич. Ферриты, Изд. ЛДНТП, 1957.

TABLA DE MATERIE

Introducere

Capitolul I. Proprietățile electrice ale semiconductoarelor

1. Structura atomului	7
2. Metalele	12
3. Cristalele	20
4. Electronii de conducție	26
5. Electroni și goluri	29
6. Semiconductoare în câmpuri electrice puternice	40
7. Redresarea	42
8. Efectul fotoelectric interior	47
9. Efectul fotovoltaic	52
10. Termoelectricitatea	55
11. Efectul Peltier	60
12. Luminescența	64
13. Unele generalizări	69

Capitolul II. Semiconductoarele în știință și tehnică

1. Termorezistențele	72
2. Rezistențe nelineare	78
3. Contoare cu cristal	80
4. Elemente de încălzire	81
5. Celule redresoare semiconductoare	82
6. Diode de cristal	36
7. Diode semiconductoare	92
8. Fotorezistențele	98
9. Celule fotoelectrice generatoare	99
10. Bateria atomică	119
11. Feritele	122
12. Luminofoarele	124
13. Termoelectrogeneratoare	137
14. Instalații de răcire termoelectrice	143
15. Încălzirea termoelectrică	159

Incheiere	164
Bibliografie	167

Redactor-responsabil de carte: Ing. M. Varia

Dat la cules 25.06.1959. Bun de tipar 21.07.1959. Hirtie cărți școlare de 65 g/m², 61×86/16. Coli editoriale 10. Coli tipar 10,5 Comanda TU 4971 A. 04519. E. 20336. Indicele de clasificare pentru bibliotecile mari 621.315.59 Indicele de clasificare pentru bibliotecile mici 621.

Tiparul executat sub comanda nr. 1964 la Întreprinderea Poligrafică „13 Decembrie 1918”, str. Grigore Alexandrescu nr. 93—95, București — R.P.R.

E R A T Ă

Pag.	Rîndul	În loc de	Se va citi	Din vina
4	17	$6.6 \cdot 10^5 \Omega^{-3} \text{cm}^{-1}$	$6.6 \cdot 10^5 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$	Editurii
12	13,21	Σ	ϵ	„
99	fig. 31	carbură de siliciu	sulfură de cadmiu	„

C. 1964